MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE FERHAT ABBAS - SETIF-
UFAS (ALGERIE)

MEMOIRE

Présenté au département d'Electrotechnique
Faculté des sciences de l'ingénieur

Pour l'obtention du Diplôme de

Magister En Electrotechnique

Option : Automatique

Par

DJAHNINE Abdelhak

Thème

Etude de la modélisation et du positionnement d'un actionneur piézoélectrique dans un système de contrôle intelligent

Soutenu publiquement le : 20 /05 / 2009 devant le jury composé de :

Dr. A. LAMAMRA	M.C. Université de Sétif	Président
Dr. S. BELKHIAT	M.C. Université de Sétif	Rapporteur
Dr. F. KHABER	M.C. Université de Sétif	Examinateur
Dr. L. RAHMANI	M.C. Université de Sétif	Examinateur

Remerciements

Je remercie en premier lieu le bon *Dieu* le tout puissant pour m'avoir donné la force et la volonté d'accomplir ce modeste travail.

Mes vifs remerciements vont à mon promoteur Monsieur le docteur ***Saad BELKHIAT***, maître de conférences au département d'électrotechnique de la faculté des Sciences de l'Ingénieur de l'université de *Sétif*, de m'avoir fait confiance en proposant ce thème, pour son encadrement, pour sa contribution et pour sa patience tout au long de la réalisation de ce travail. Je lui exprime toute ma gratitude et mon estime.

J'exprime également mes remerciements à Monsieur le docteur ***Atheman LAMAMRA***, maître de conférences au département d'électrotechnique de la faculté des Sciences de l'Ingénieur de l'université de *Sétif*, qui ma fait l'honneur de s'intéresser à ce travail.

Je tiens également à présenter ma profonde gratitude aux Messieurs les docteurs ***Farid KHABER***, et ***Lazhar RAHMANI***, tous maître de conférences au département d'électrotechnique de la faculté des Sciences de l'Ingénieur de l'université de *Sétif*, qui ont accepté d'examiner mon travail.

J'exprime ma profonde reconnaissance à mes parents pour m'avoir toujours aidé et encouragé.

Je remercie tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, pour la réalisation de ce travail.

Abstract

Vibration control is a large area of interest either in all sections of industry or in research. One way to control the vibration of dynamic systems is by using piezoelectric materials (*PZT's*). *PZT's* have been used to reduce vibration in both active and passive control systems and that is due to their special characteristics.

In this work, the effect and the modeling of the *PZT* actuator location on controlling the vibrations is studied .Tow models are used and developed in this study: mechanic model is based on positioning mechanism (*PM*) and mathematic model's is based on the free energy theory of *Landau Devonshire*, for used as controllers and damping of the vibrations.

In order to design, the positioning mechanism and the actuators (*PEAs*) is developed and described the linear hysteretic behavior by a differential equation of the mechanic system's (mass, spring, damping).

The second model is developed by the free energy theory of *Landau Devonshire*, and described the non-linear hysteretic behavior. Well known disadvantages of *PEAs* are the fact that they show the non-linear hysteretic behavior and lengthening saturation.

The non-linear hysteretic characteristic of piezoelectric actuators makes precise position control very difficult. In this disadvantage, we add a *PID* controller for linearized the hysteretic behavior. These two models, used as a controller for reduce the vibration in flexible beam structure.

Keywords: Piezoelectric materials, piezoelectric actuators and sensor, intelligent control systems.

الملخص

التحكم بالاهتزازات حاليا واحد من أهم مجالات الهندسة سواء في القطاع الصناعي أو في مجالات الأبحاث. استخدام المواد ذات الكهرباء الاجهادية يعتبر واحد من أهم الطرق المهمة في التحكم الصناعي في الأنظمة الديناميكية. تستخدم المواد ذات الكهرباء الاجهادية لتقليص الاهتزازات في مختلف أنواع أنظمة التحكم و ذلك بسبب خواصها الفريدة.

في هذه الرسالة, تأثير وضعية مشغل الكهرباء الاجهادية علي القدرة للتحكم في الاهتزازات سوف يشرح ويفصل.

في هذه الدراسة نستعمل نوعين من النماذج: نموذج ميكانيكي' الذي يعتمد علي وضعية جملة ميكانيكية', و نموذج تحليلي 'الذي يعتمد علي نظرية الطاقة الحرة ً لندو دفونشيرً لتقليص الاهتزازات.

النموذج الأول يتشكل و يعتمد علي معادلة تفاضلية لجملة ميكانيكية ً الكتلة, النابض, المخمدً, تشغل بواسطة مشغل الكهرباء الاجهادية الذي يسلك سلوك المنحنى الخلفي الخطي.

النموذج الثاني الذي يعتمد علي نظرية الطاقة الحرة للندو دفونشير, التي تتصف بنفس خصائص المواد الاجهادية, وتسلك سلوك منحنى خلفي غير خطي. لكن نعلم جيدا أن من بين أهم عوائق استعمال المشغلات ذو الكهرباء الاجهادية عدم خطية سلوك المنحنى الخلفي و تشبعها بسرعة عند شحنها.

خاصية عدم خطية المنحنى الخلفي عند مشغلات الكهرباء الاجهادية يجعل الدقة في المراقبة صعبة. و لهذا, سنستعمل المنظم*PID* لجعل سلوكها خطي.

النموذجان يستعملا في مراقبة و إخماد الاهتزازات في الإنشاءات المرنة.

الكلمات الجدية. المواد ذات الكهرباء الاجهادية, اللواقط و المحرضات ذات الكهرباء الاجهادية, الأنظمة الذكية.

Les abréviations

A_v : correspond à la vitesse de vieillissement……..15
APA120ML : Actionneur piézoélectrique linéaire……...57
ASAC : Active Structural Acoustic Control…….....83
A_T: est la surface de la poutre……..……..…...85
A_b : La surface de l'élément de la poutre…….…88
BaTiO3: les titanates de baryum.....06
β: Constante d'imperméabilité diélectrique *(m/F*)……...18
β: Constantes d'amortissement…….…….85
b : La largeur (m)……..85
C_c : la constante de Curie……..……..……15
c: Raideur ou constante élastique (N/m^2)……..……..19
CEDRAT: Société de fabrication des actionneurs piézoélectrique linéaire…….…38
c_s : Constante d'amortissement du *MP*……..……53
c_p : Constante d'amortissement du *PEA*…….……..53
c : constant d'amortissement totale du modèle (*MP* + *PEA*)……..……..53
CANSMART: Canadien Smart Materials and Structures Group…….……80
CNRC : Conseil national de Recherches du Canada……..……..84
c: est une est un constante de l'équation de la poutre……..……86
D : Déplacement électrique ou induction *(C/ m^2)*…….……18
d: Constante piézoélectrique qui traduit la proportionnalité entre la charge et la contrainte à champ nul ou constant (C/N)……..…… 19
DSP : carte d'interface et d'acquisition de donnés……..……57
d_{ij} : Constante de déformation piézoélectrique (Vm/N)……..87
ε_r^a : la constante diélectrique relative caractérisant la permittivité de l'isolant par rapport au vide……..……09
E: champ électrique…….……14
Ec: champ de coercitif……..…….…….…14
ε : Permittivité électrique *(F/m)*…….……...18
e : Constante piézoélectrique qui traduit la proportionnalité entre la charge et la déformation à champ nul ou constant (C/m^2)…….…….19
ΔE : La différence d'électronégativité…….…….28
ζ : L'amortissement relatif……55
ε: déformation…….…..…64
E: est le module élastique d'Young……...…86
E_b : Module d'Young (Gpa) de la poutre……..……...86
E_p : Module d'Young (Gpa) de la poutre……..……...87
e: La distance entre l'axe naturel de la poutre et la couche piézoélectrique……91
F_0+F_1, F_0-F_2 : Les forces d'actionnement dues aux tensions appliquées……...53
$F= F_1+F_2$: est la force totale d'actionnement……...……54
f_0: la fréquence propre non amorti……55

F : L'énergie libre……64
F_0 : L'énergie libre à l'état initiale……...64
f_{ext} : Force éxtérieur applique sur la poutre fléxible……..…….85
f^p: est la force de commande (actionnement)……..…..89
f : est la force totale applique sur le système……..…..90
g : Constante piézoélectrique qui traduit la proportionnalité entre la contrainte et le champ à induction nulle ou constant (m^2/C)……...…19
G_c : est le gain du signal de conditionnement égale à *100*……..……...….91
g_{31} : est un constante égale, ***$g_{31} = d_{31}*E_p$***……..……....91
h : Constante piézoélectrique qui traduit la proportionnalité entre la déformation et le champ à induction nulle ou constant (m/V)……19
η: facteur d'amortissement relatif……..…47
h: est un vecteur constante qui détermine le type et la position de l'actionneur sur la poutre..91
I.R.E: (***I***nstitute of ***R***adio ***E***ngineering)……22
I : est le moment d'inertie……86
I_b : La longueur (m) de l'élément la poutre……...86
I_p : La longueur (m) de l'élément capteur/actionneur piézoélectrique……..……..87
i_b : Le moment inertiel de l'élément de la poutre……...88
K : Le coefficient de couplage statique.…….……..22
k_s : Constante de la rigidité du *MP*……53
k_p : Constante de la rigidité du *PEA*……..53
k : Constante de la rigidité du (*PEA + MP)*……..54
kp: l'élément proportionnel d'un régulateur *PID*…….…….73
K^b : La matrice de la rigidité d'un élément de la poutre……..…….…….88
K^p : La matrice de la rigidité d'un élément capteur/actionneur…..…….…..89
K : est la matrice globale de la rigidité du système (poutre + l'élément piézoélectrique)…....90
Δl_j : est la déformation parallèle à *j*……..…..40
L : La longueur de la poutre flexible……...….85
mh: Le moteur Shinseï……..45
MP : mécanique de position……52
m_s : La masse du *MP*……..……..53
m_p : La masse de système (*PEA + MP)*……..……53
m: la masse totale du modèle(*PEA + MP)*……..……54
M^b : La matrice de la masse d'un élément de la poutre…….……88
M^p : La matrice de la masse d'un élément capteur/actionneur……..……89
M : est la matrice globale de la masse de système (poutre + l'élément piézoélectrique)…..…90
N : Vecteur de position……..…88
$\theta_{1,2}$: La position des nœuds *1,2,* d'un élément de la poutre……85
PZT : Le titanate zirconate de plomb……...06
PVDF : *Poly-Vinyl-DiFluoridène*……09
P : polarisation…..……..…14
Ps : polarisation spontanée……...14
Pr : polarisation rémanente……..……14
PEA : *P*iézo-*E*lectrique *A*ctionneur……...……...53
PID : Régulateur (Proportionnel, Intégral, Dérive)……..73
Q : Le coefficient de surtension mécanique……..22
q: Vecteur de position……..……88
Ra, Rb et Ro : les rayons ioniques respectifs des cations *A*, *B* et de l'oxygène……27
r: Résistance associe avec le ferroélectrique parfait……..…63
ρ_b : Masse volumique de la poutre (kg/m^3)……..……..……..86

ρ_p **:** Masse volumique de l'élément piézoélectrique (kg/m^3)……87
S : Déformation relative…….…..19
s: Compliance ou susceptibilité élastique (m^2/N)……19
S : entropie……64
t_0**:** est le point de départ de la mesure……...……15
T_0 : est la température de *Curie Weiss* (*K*)……..…….……15
t: le facteur de tolérance…….…...27
T : température…….….64
Ti: l'élément intégral…….…….…….…….…73
Td: l'élément dérive……..……..…….……73
t_b **:** Epaisseur de la poutre (mm)…….…....86
t_a, t_s **:** Epaisseur de l'élément piézoélectrique (mm)…….…...…87
U_E **:** L'énergie élastique…….…..…22
U_D **:** Energie diélectrique…….…..…...22
U_m **:** Energie d'interaction, ou mutuelle, élasto électrique……...…22
$u_0 + u$ ***et*** $u_0 - u$ **:** les tensions appliquées sur l'élément piézoélectrique……..…53
U : énergie interne……..…….64
V_i **:** est la tension appliquée suivant la direction *i*…….……...……40
W(x, t) : est la fonction de déplacement……...…86
X^t **:** est la transposée de la matrice *X*……..…...18
X^E **:** indique que la grandeur *X* est considérée à champ électrique *E* constant…….....18
X^D : indique que la grandeur *X* est considérée à induction électrique *D* constante…….…18
X^T **:** indique que la grandeur *X* est considérée à contrainte *T* constante……...…18
X^S **:** indique que la grandeur *X* est considérée à déformation *S* constante……....18
$X_{A\text{-}O}$ **:** est les différence d'électronégativité entre A et *O*…….…28
$X_{B\text{-}O}$ **:** est les différence d'électronégativité entre *B* et *O*……..28
y: le déplacement simulé……..53
σ **:** contrainte……64
δ_j : est la déformation suivant la direction *j*……..40

Liste des figures

Figure I.1. Illustration des effets piézoélectriques.....07
Figure I.2. Piézoélectricité du quartz naturel à l'équilibre (a)
et avec une force appliquée (b)……...08
Figure I.3. Organisation des 32 classes cristallines.....09
Figure I.4 : Polarisation des céramiques piézoélectriques……..…….12
Figure I.5 : Evolution des orientations des domaines ferroélectriques
sous l'effet d'un champ électrique.....12
Figure I.6 : Représentation schématique de l'apparition de la piézoélectricité 13
Figure I.7 : Cycle d'hystérésis $P = f(E)$ d'un matériau ferroélectrique 14
Figure I.8 : Evolution des cycles d'hystérésis $P = f(E)$ avec la température pour
$Pb_{0,85}Ba_{0,15}(Zr_{0,56}Ti_{0,42}Nb_{0,02})O_3$.....16
Figure I.9 : Relations entre les propriétés thermiques,
électriques et mécaniques d'un cristal …….....17
Figure I.10 : Définition des directions dans un milieu piézoélectrique 20
Figure I.11 : Modes de vibrations fondamentaux d'une céramique piézoélectrique 21
Figure I.12 : Structure perovskite cubique du *PZT*.....27
Figure.I.13. Cycle de fabrication des céramiques *PZT* par voie solide 28
Figure.I.14. Four de croissance cristalline (Société *GERO, Allemagne*) 29
Figure.II.1. Principes d'actionnement.....34
Figure.II.2. Actionneur linéaire piézoélectrique *CEDRAT* 38
Figure.II.3. Type des actionneurs piézoélectriques existants selon leur forme.....39
Figure.II.4. Actionneur piézoélectrique de type multicouches (stack) 40
Figure.II.5. Actionneur piézoélectrique de type laminaire.....41
Figure.II.6. Actionneur piézoélectrique de type tube.....42
Figure.II.7. Actionneur piézoélectrique de type hybride (a) : *Tiliting system*
(b) : *PZS-200-Burleghigh*.....43
Figure.II.8. Actionneur piézoélectrique de type bimorphe 44
Figure.II.9. Mouvement à hystérésis nulle.....44
Figure.II.10. Mouvement à hystérésis non nulle.....45
Figure.II.11. Modèle mécanique équivalente d'un actionneur piézoélectrique 47
Figure.II.12. Modèle mécanique équivalente au modèle de la figure (II.11).....48
Figure.II.13. Modèle électrique équivalente d'un actionneur piézoélectrique.....48
Figure.II.14. circuit électrique équivalent d'un matériau piézoélectrique 50

Figure III. 1: Mécanisme de position (masse, ressort, amortisseur) conduit par les actionneurs piézoélectriques 53
Figure III .2 le modèle mécanique de (*MP*) et des *PEAs* 53
Figure.III.3 le modèle mécanique simplifié, équivalent au modèle de la figure (III.2) 54
Figure.III.4. Test expérimental de déplacement d'un actionneur piézoélectrique référence (*APA120ML*) 57
Figure.III.5. Déplacement mesuré par le vibromètre en fonction de la tension applique sur la couche *PZT* d'un actionneur (*APA120ML*) 58
Figure III.6. Le déplacement y simulé en fonction de la tension applique *u* 58
Figure.III.7. Déplacement *y* en fonction de la tension *u* pour *f=500Hz* 59
Figure.III.8. Déplacement *y* en fonction de la tension *u* pour *f=100Hz* 60
Figure.III.9. Déplacement *y* en fonction de la tension *u* pour *f=10Hz* 60
Figure.III.10. Déplacement *y* en fonction de la tension *u* pour $c = 7.71*10^4$ *(kg/s)* 61
Figure.III.11 Déplacement *y* en fonction de la tension *u* pour**.** $c = 3.71*10^4$ *(kg/s)* 61
Figure.III.12. Déplacement *y* en fonction de la tension *u* pour $c = 3.71*10^3$ *(kg/s)* 62
Figure.III.13. Linfluence du paramètre *c* sur le cycle d'hystérésis 62
Figure III.14: Modèle ferroélectrique série 63
Figure.III.15. Polarisation *P* en fonction du champ électrique *E* appliqué 66
Figure.III.16. Effet de la fréquence sur le cycle d'hystérésis lorsque *f = 20Hz* 67
Figure.III.17. Effet de la fréquence sur le cycle d'hystérésis lorsque *f = 5Hz* 67
Figure.III.18. Effet de la fréquence sur le cycle d'hystérésis lorsque *f = 1Hz* 68
Figure.III.19. Effet de la variation de fréquence sur le cycle d'hystérésis 68
Figure.III.20. L'effet de paramètre *r* sur le cycle d'hystérésis lorsque $r = 10^3 Ohm$ 69
Figure.III.21. L'effet de paramètre *r* sur le cycle d'hystérésis lorsque $r = 10^2$ *Ohm* 69
Figure.III.22. L'effet de paramètre *r* sur le cycle d'hystérésis lorsque *r = 10 Ohm* 70
Figure.III.23. L'effet de la variation du paramètre *r* sur le cycle d'hystérésis 70
Figure.III.24. Effet du paramètre P_r sur le cycle d'hystérésis pour $P_r = 0.1*10^{-2}$ (C/m^2) 71
Figure.III.25. Effet du paramètre P_r sur le cycle d'hystérésis pour $P_r = 0.3*10^{-2}$ (C/m^2) 71
Figure.III.26. Effet du paramètre P_r sur le cycle d'hystérésis pour $P_r = 0.4*10^{-2}$ (C/m^2) 72
Figure.III.27. Effet du paramètre P_r sur le cycle d'hystérésis pour $P_r = 0.5*10^{-2}$ (C/m^2) 72
Figure.III.28.L'allure linéaire du cycle d'hystérésis pour : $r = 10^4$ *(Ohm)* 73
Figure.III.29. L'allure linéaire du cycle d'hystérésis pour : $r = 10^3$ *(Ohm)* 74
Figure.III.30. L'allure linéaire du cycle d'hystérésis pour : $r = 10^2$ *(Ohm)* 74
Figure.III.31. Cycle d'hystérésis d'un film piézoélectrique ($BaTiO_3$) mesuré 75
Figure.III.32. Cycles d'hystérésis simulés d'après les paramètres identifiés de cycles mesurés de film ($BaTiO_3$) 76
Figure.III.33. Cycles d'hystérésis améliorés par le régulateur *PID* proche de la courbe expérimentale 77
Figure.IV.1 : Suppression de la vibration d'une poutre cantilever grâce à l'approche de la structure intelligente 81

Figure.I.V.2 : Intégration de matériaux intelligents dans une structure composite au moyen de la technologie des circuits imprimés 82
Figure.IV.3. Poutre à structure flexible.....84
Figure.IV.4. Elément d'une poutre à structure flexible 84
Figure.IV.5. Elément d'un capteur/actionneur piézoélectrique 88
Figure.IV.6. Actionneur/capteur piézoélectrique à la position *2* sur une structure flexible....91
Figure.IV.7. Sortie du capteur *2* avant la commande.....91
Figure.IV.8. Schéma de principe de vibration d'une poutre flexible contrôlée par un actionneur piézoélectrique…….....…..…….92
Figure.IV.9. Sortie du capteur *2* avec contrôle (actionneur linéaire)……...92
Figure.IV.10. Sortie du capteur *2* avec contrôle (actionneur non linéaire)……..93
Figure.IV.11. Sortie du capteur *2* avec contrôle (actionneur non linéaire) + *PID* 93
Figure.IV.12. Actionneur/capteur piézoélectrique à la position *4* sur une structure flexible..94
Figure.IV.13. Sortie du capteur *4* avant la commande.....95
Figure.IV.14. Sortie du capteur *4* avec contrôle (actionneur linéaire)…….95
Figure.IV.15. Sortie du capteur *4* avec contrôle (actionneur non linéaire)……..96
Figure.IV.16. Sortie du capteur *4* avec contrôle (actionneur non linéaire) + *PID* 96
Figure.IV.17. Une comparaison entre les deux positions (*2* et *4*) avec contrôle linéaire……97
Figure.IV.18. Une comparaison entre les deux positions (2 et 4) avec contrôle non linéaire……..…….....98
Figure.IV.19. Une comparaison entre les deux positions (*2* et *4*) avec contrôle non linéaire + *PID*……..…….....98
Figure.IV.20. Sortie du capteur à la position *2*, avant linéarisation du cycle d'hystérésis améliorés par un régulateur *PID* proche de la courbe expérimentale……...…99
Figure.IV.21. Sortie du capteur à la position *2*, après linéarisation du cycle d'hystérésis améliorés par un régulateur *PID* proche de la courbe expérimentale…….....100
Figure.IV.22. Sortie du capteur à la position *4*, avant linéarisation du cycle d'hystérésis améliorés par un régulateur *PID* proche de la courbe expérimentale…….100
Figure.IV.23. Sortie du capteur à la position*4*, après linéarisation du cycle d'hystérésis améliorés par un régulateur *PID* proche de la courbe expérimentale…….101

Liste des tableaux

Tableau I.1. Constantes physiques de matériaux piézoélectriques 10
Tableau I.2. Avantages et inconvénients de chaque famille de matériaux …….……....10
Tableau I.3. Equations de la piézoélectricité ……..……..……..….18
Tableau I.4. Glossaire des symboles dans la piézoélectricité 19
Tableau I.5. Echantillons pour caractérisation des modes fondamentaux 23
Tableau I.6. Caractéristiques des matériaux piézo-électriques couramment utilisés.....26
Tableau I.7. Listes des principales applications du *PZT* massif 31
Tableau.II.1. Présentation les avantages et les inconvénients pour certains principes d'actionnement.....36
Tableau .II.2. Analogie électromécanique 49
Tableau.IV.1. Propriétes de la poutre à structure flexible 85
Tableau.IV.2. Propriétes du capteur/actionneur piézoélectrique 85

Intoduction générale

Introduction générale

Généralité et problématique :

Ces dernières années ont vu l'émergence de nombreux développements dans le domaine des structures dites intelligentes, c'est-à-dire des structures intégrant des capteurs et des actionneurs couplés à un calculateur et capables de réagir aux excitations extérieures. Parmi les nombreux types de matériaux que l'on peut trouver dans la nature, les matériaux piézoélectriques présentant des caractéristiques remarquables.

Grâce à leur aptitude de conversion électromécanique et à leur faible encombrement, l'utilisation de transducteurs piézoélectriques ouvre la porte à un vaste choix d'applications en dynamique des structures **[1]**.

Les matériaux piézoélectriques sont actuellement au cœur du développement scientifique et technologique moderne. Leur utilisation est étendue à travers les champs d'applications les plus innovateurs à savoir, l'énergie électrique, l'informatique, la télécommunication, …,

Cela revient aux propriétés piézoélectriques très variées que possèdent ces matériaux ; des propriétés qui se manifestent à différentes échelles telles que l'échelle atomique, microscopique, et macroscopique, ce qui les rend un vaste domaine de recherche que se soient pour les physiciens ou pour les technologues **[2]**.

La part des automatismes électriques dans les systèmes mécaniques est sans cesse croissante. Une assistance est de plus en plus souvent proposée aux usagers au cours de leurs manipulations quotidiennes. L'énergie électrique, grâce à sa propreté et sa facilité de mise en œuvre, est alors la source principale d'énergie. L'industrie automobile, par exemple, développe de nouvelles fonctionnalités qui améliorent le confort du conducteur : rétroviseurs électriques, appuies têtes commandés, conduite assistée...etc.

Ce sont aussi les équipementiers de l'avionique qui tentent de remplacer les actuels vérins hydrauliques par des actionneurs électriques. Ainsi, depuis le milieu des années 80 l'élément le plus cher d'un appareil quelconque utilisant de l'électronique est rapidement devenu le transducteur, c'est-à-dire le capteur et l'actionneur **[3]**.

La conversion d'énergie à base de matériaux électroactifs, couplées à une transmission des efforts par frottement, permet alors d'envisager des structures à fort couple massique particulièrement intéressantes pour les applications embarquées, notamment pour les applications aéronautiques ou spatiales. Plus récemment, d'autres applications dédiées au domaine de l'aéronautique consistent à exploiter les actionneurs piézoélectriques non pas dans l'actionnement localisé, mais réparti pour le contrôle d'écoulement par exemple.

Dans ce contexte, où la discrétion sonore, l'encombrement réduit et les bonnes performances dynamiques des actionneurs sont appréciées, l'actionneur piézoélectrique trouve sa place. Le potentiel commercial de ces produits est vaste.

Les applications vont des domaines de l'automatisation à la médecine, en passant par la biochimie ou l'industrie du jouet, sans oublier l'industrie automobile qui représente déjà un marché majeur pour les microsystèmes (air bag, ABS, allumage électronique, etc)**[4]**.

L'expansion des activités industrielles et l'augmentation des trafics routiers ou aériens ces dernières années ont conduit à une très forte croissance du niveau de bruit dans notre vie quotidienne. Une enquête récente révèle qu'environ 80 millions d'habitants de l'Union Européenne sont exposés, à leur domicile, à des niveaux de bruit inacceptables, et 170 millions à des niveaux provoquant un gène incontestable **[5]**.

Toutefois pour répondre à ces problématiques, plusieurs solutions sont étudiées pour être à la fois plus rapides et plus précises et en même temps compenser ce phénomène. Parmi ces solutions, l'augmentation de la rigidité de corps vibrant qui permet de repousser les fréquences de ces modes au-delà de la bande passante de l'actionneur. Cependant cette solution induit un supplément de poids de corps vibrant, qui n'est pas acceptable pour les fortes accélérations requises, on bien par la présence de ces fréquences parasites est autorisée dans le système.

Elles peuvent alors être compensées par la commande des actionneurs piézoélectriques linéaires. La commande par des actionneurs piézoélectriques est l'une de nouvelles méthodes de contrôle actif, qui se base sur l'emplacement optimal des actionneurs en vue de mieux contrôler la structure flexible, d'agir pour supprimer ou réduire les vibrations ou les bruits indésirables. Celle ci doit donc maîtriser le contenu spectral de la force générée par les actionneurs piézoélectriques linéaires. C'est l'un des objectifs de ce mémoire.

Objectifs de ce travail :

Dans ce travail, trois principaux objectifs étaient fixés à savoir :

1- Recherche bibliographique sur les matériaux piézoélectriques et leurs caractéristiques.
2- Modélisation et simulation d'un actionneur piézoélectrique par un modèle linéaire mécanique et non linéaire (modèle de *Landau Devonshire*).
3- La piézoélectricité comme matériau intelligent pour amortir les vibrations.

Présentation du mémoire :

Pour aboutir aux objectifs de ce travail, notre mémoire est structuré en quatre chapitres. Dans le premier chapitre on passera en revue les matériaux piézoélectriques. Il présentera un rappel historique sur l'évolution des recherches dans le domaine piézoélectrique, un état de l'art de ces matériaux intelligents, leurs propriétés et les modes de vibration aérospatiale et leurs applications dans l'industrie.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons quelques types de transducteurs leurs avantages et inconvénients. Le comportement de ces transducteurs comme actionneur ou comme capteur sont donnés. L'état de l'art de quelques approches analytiques sont données.

Le troisième chapitre est consacré à la modélisation d'un actionneur piézoélectrique. Deux modèles sont présentés. L'un est représenté par un système mécanique (que nous appelons mécanique de position). Le système composé de (masse, ressort et amortisseur) est proche de la caractéristique d'un actionneur linéaire après élimination des pertes. Le deuxième modèle analytique décrit le comportement du matériau piézoélectrique comme actionneur de position appelé modèle de Landau Devonshire. Les deux modèles sont comparés. Le modèle de Landau Devonshire présente toutes les caractéristiques d'un cycle d'hystérésis d'un actionneur piézoélectrique.

Dans le quatrième chapitre, on présente quelques méthodes de contrôle intelligent qu'on peut appliquer pour amortir les vibrations des structures flexibles. Les modèles étudiés sont appliqués pour le contrôle intelligent de la poutre sur laquelle sont distribués des actionneurs et des capteurs afin de déterminer la position optimale.

Chapitre I

Les matériaux piézoélectriques

I.1. Introduction:

L'effet piézoélectrique a été découvert il y a plus d'un siècle, il intéresse toujours autant la communauté scientifique. En effet, c'est en *1880* que l'effet piézoélectrique est découvert sur le quartz par les frères *Curie*. En *1917 Langevin* se sert de cristaux de quartz pour engendrer des ondes de pressions, puis, la découverte dans les années *40* des sels piézoélectriques comme le $BaTiO_3$ permettent d'augmenter le couplage électromécanique (application pour les sonars). C'est dans les années *1950-1960* que de nouvelles céramiques donnent un deuxième souffle à la piézoélectricité, les oxydes ternaires de plomb permettent de réaliser un saut technologique qui n'a pas été renouvelé.

Les principaux avantages de ces matériaux résident dans d'excellentes propriétés piézoélectriques un fort coefficient de couplage électromécanique ce qui entraîne une grande efficacité d'actionnement et une grande linéarité des propriétés. Dans un premier temps, ces matériaux, sous forme de céramiques massives, étaient utilisés pour effectuer des micro déplacements ou des micro positionnements.

Aujourd'hui, pour des raisons de réduction de taille des transducteurs, ces céramiques sont intégrées sous forme de films de plus en plus minces. Pour cela les techniques de dépôt en couches minces utilisées en microélectroniques ont été appliquées à ces céramiques. D'autres céramiques dérivées du *PZT* (céramiques dopées : *PZNT, PMN-PT, PLZT*…) présentent des propriétés supérieures au *PZT* mais elles ne sont pas disponibles industriellement.

Le titanate zirconate de plomb (*PZT*) est un excellent représentant de la catégorie des céramiques ferroélectriques.

Les propriétés de la piézoélectricité et de la ferroélectricité sont rappelées dans ce chapitre. Nous rappellerons la structure cristalline du *PZT* ainsi que les phases possibles en fonction du taux de zirconium ajouté et les différents modes de vibrations. Un rappel des équations régissant la piézoélectricité pour les céramiques massives nous permet d'introduire les notions de coefficients piézoélectriques ainsi que de coefficient de couplage.

Enfin, l'utilisation des céramiques massives pour leurs applications privilégiées est présentée sous la forme d'un tableau non exhaustif **[6]**.

I.2. Définition de la piézoélectricité:

Etymologiquement, le préfixe 'piézo' vient du terme grec piézen qui signifie presser ou serrer. On appelle piézoélectricité, la propriété que possèdent certains matériaux (cristaux, céramiques, polymères ou composites) à pouvoir transformer une énergie électrique en énergie mécanique et réciproquement (effet direct ou inverse). La figure (I.1) présente les deux effets **[7,3]**.

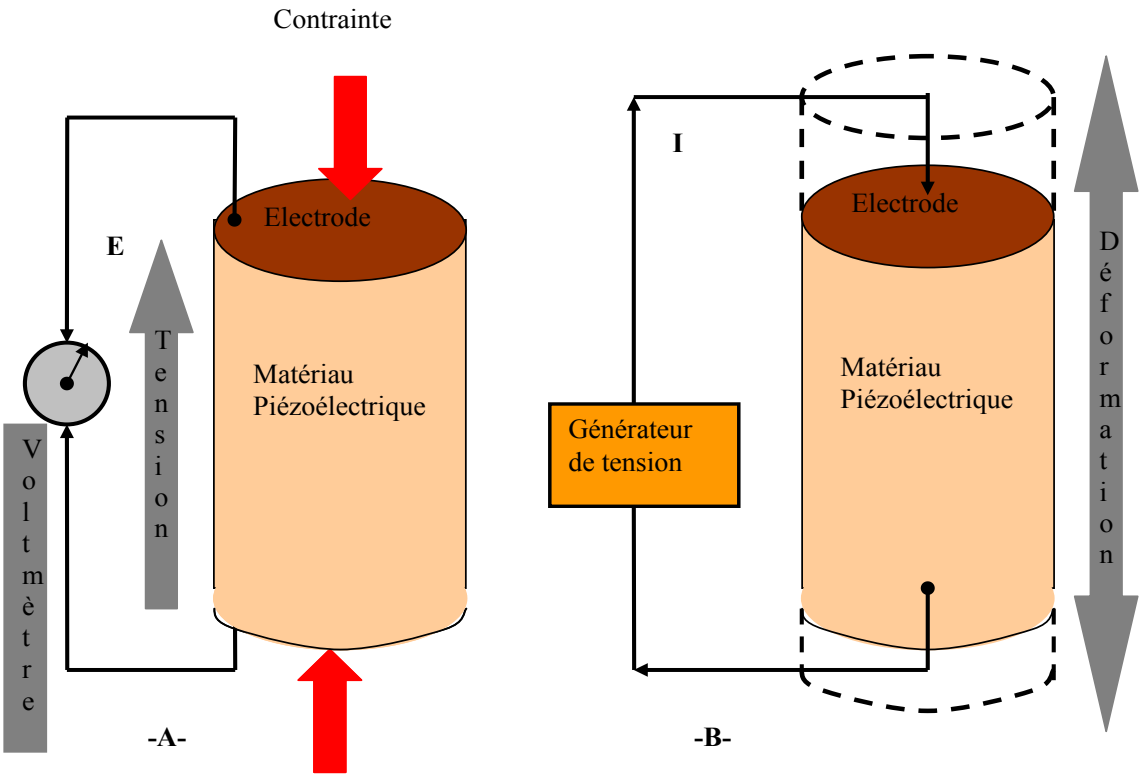
I.2.1 Effet direct:

Suite à une déformation mécanique on voit apparaître, dans certains matériaux, une charge électrique. L'apparition de charges par l'application d'une contrainte mécanique sur un cristal fut observée pour la première fois en *1817* par l'*Abbé R. J. Haüy* sur certains cristaux. Cet effet fut étudié de manière plus rigoureuse par les frères *Pierre* et *Jacques Curie* sur des cristaux de quartz **[3]**.

I.2.2 Effet inverse:

L'effet réciproque, encore appelé effet inverse, fait que l'application d'un champ électrique externe provoque une déformation mécanique du matériau.

C'est *Lippmann* qui suggéra théoriquement l'effet inverse qui fût confirmé expérimentalement par les frères *Curie* en *1881* **[8]**.



(**A**) : Effet direct : Sous l'effet d'une contrainte, il apparaît des charges.

(**B**) : Effet indirect : L'application d'une tension engendre une déformation.

Figure I.1: Illustration des effets piézoélectriques **[9]**.

I.3. La piézoélectricité naturelle :

Certains cristaux naturels tels que le quartz sont piézoélectriques. Une maille de cristal de quartz est composée d'atomes de silicium portant une charge électrique positive et d'atomes d'oxygène portant une charge électrique négative.

Sur la figure (I.2) on voit qu'en l'absence de déformation, le barycentre des charges positives est confondu avec celui des charges négatives (représenté par le point noir). Si on applique une force de compression, la maille cristalline se déforme de telle sorte que les barycentres des charges positives et négatives s'écartent. On crée ainsi un dipôle électrique qui par réaction, va faire apparaître des charges de signes opposés sur les deux électrodes, c'est l'effet piézoélectrique direct.

Si au contraire, on apporte des charges électriques (c'est à dire que l'on crée une différence de potentiel entre les électrodes), alors, pour rétablir l'équilibre des forces électrostatiques, c'est la maille cristalline qui se déforme, c'est l'effet inverse ou réciproque **[6]**.

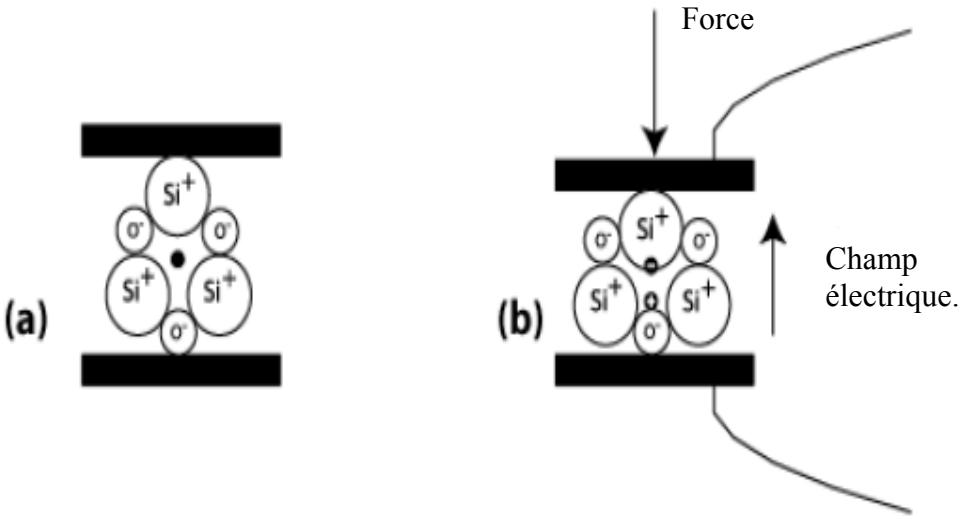


Figure I.2. Piézoélectricité du quartz naturel à l'équilibre (a) et avec une force appliquée (b) **[6]**.

I.4. Les matériaux piézoélectriques:

Tous les matériaux ne sont pas piézoélectriques, en effet, il faut déjà que la maille cristalline ne possède pas de centre de symétrie, autrement dit, tous les matériaux piézoélectriques sont anisotropes. Ceci signifie qu'ils possèdent des propriétés physiques variant selon la direction considérée. Parmi les *32* classes cristallines existantes, *20* sont dépourvues de centre de symétrie et peuvent donc présenter l'effet piézoélectrique, figure (I.3).

Dix des vingt classes cristallines piézoélectriques présentent une polarisation électrique spontanée (aussi appelée moment dipolaire permanent) en l'absence de contrainte ou champ extérieur.

Ces classes sont dites polaires et sont appelées pyroélectriques en raison de l'effet de la température sur leur polarisation spontanée **[6, 10]**.

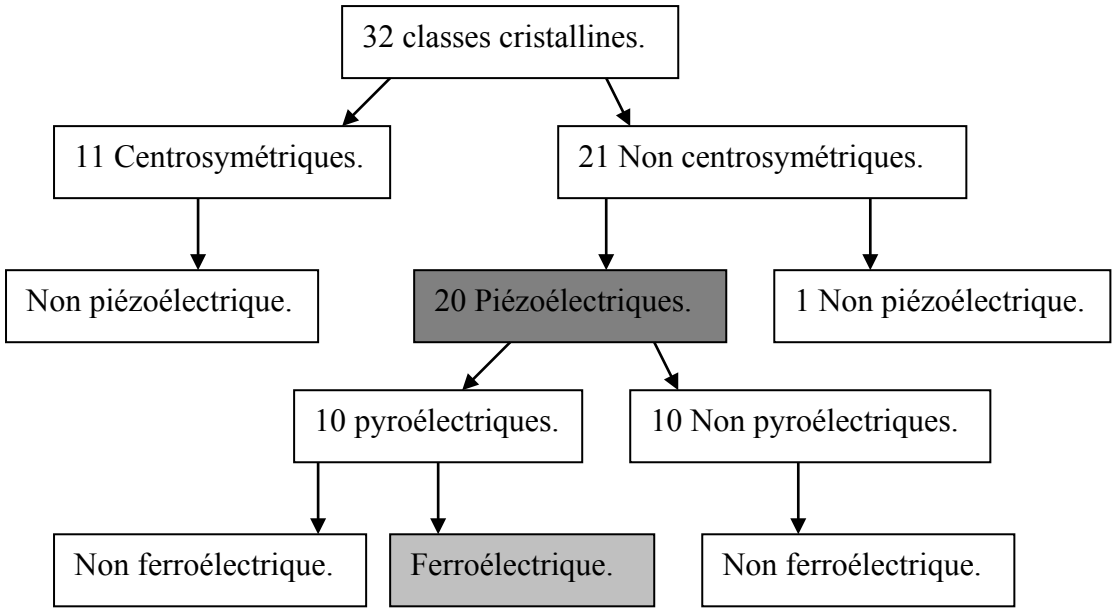


Figure I. 3 : Organisation des 32 classes cristallines **[6, 8]**.

I.4.1. Les principaux matériaux piézoélectriques:

Les matériaux piézoélectriques peuvent se regrouper en quatre classes principales, les cristaux, les polymères, les céramiques et les composites :

a- Les cristaux : dont le plus connu est le quartz, ont des propriétés peu attrayantes pour des applications telles que les générateurs d'ultrasons.

Leurs principaux défauts sont un ε_r^a (la constante diélectrique relative caractérisant la permittivité de l'isolant par rapport au vide) et des constantes piézoélectriques peu élevées, un coefficient de couplage électromécanique trop faible.

b- Les polymères ou les co-polymères : comme respectivement le *Poly-Vinyl-DiFluoridène* ou *PVDF* et le *P* (*VDF-TrFE*) partiellement cristallisés, mécaniquement adaptés aux grandes déformations. Le *PVDF* en est le représentant le plus connu, les chaînes de polymère peuvent s'orienter lorsqu'on applique un champ électrique, ils sont découverts par *KAWAI* en *1969*.

Aujourd'hui, l'utilisation des polymères piézoélectriques est l'une des technologies les plus en croissance dans le monde avec plusieurs milliers de dollars de marché

c- Les céramiques piézoélectriques : se sont vite imposées par leurs forts coefficients piézoélectriques. La famille des céramiques comporte de nombreux éléments, citons entre autres, les titanates de baryum qui sont les ancêtres des céramiques actuelles, les titanates de plomb ou les méta-niobates de plomb utilisés pour l'imagerie haute résolution.

La famille des *PZT* (plomb, zirconate, titanate) compte à elle seule cinq à six compositions différentes sans compter les structures dopées type *PLZT*. C'est cette famille des *PZT* qui offre le plus de possibilités au niveau industrialisation.

Par ailleurs le *LiNbO3* est couramment utilisé en imagerie haute fréquence. Notons que les céramiques sont des matériaux fabriqués par frittage d'un mélange d'oxydes et que les procédés de fabrication sont ajustables afin de pouvoir adapter leurs propriétés diélectriques, mécaniques et piézoélectriques à la demande.

d- Les composites : ils sont obtenus par mélange de différents matériaux piézoélectriques afin de tirer avantage des propriétés de chacun.

Les trois dernières classes de matériaux doivent subir une polarisation pour acquérir la piézoélectricité.

Ci-dessous se trouve un tableau (I.1) récapitulatif des propriétés des différents matériaux piézoélectriques évoqués plus haut **[6]**.

	Quartz SiO_2	$LiNbO_3$	$BaTiO_3$	*PVDF*	*PZT*
Densité ($g\ cm^{-3}$)	*2.65*	*4.64*	*5.7*	*1.76*	*7.5*
Constant diélectrique ε_{11}	*4.5*	*40*	*1700*	*12*	*200-400*
Température de Curie en C^0	*573*	*1210*	*130*	*180*	*<350*

Tableau I.1. Constantes physiques de matériaux piézoélectriques **[6]**.

Les avantages et les inconvénients de chacune des *4* classes de matériaux piézoélectriques sont résumés dans le tableau (I.2)

	Avantages	Inconvénient
Cristaux	Résolution (aptitude à discriminer deux valeurs proches l'une de l'autre) très élevée.	Leurs coûts de fabrication sont élevés, ils sont fragiles, difficiles à travailler et à adapter à une géométrie complexe.
Céramiques	Ils sont usinables et faciles à transformer, offrent un très large éventail de performances.	Ils doivent être polarisés pour acquérir la propriété piézoélectrique.
Polymères	Immunité aux interférences électromagnétiques, résistances chimiques, durabilité et bas prix.	Ils doivent être polarisés pour acquérir
Composites	Variables selon la composition.	Variables selon la composition.

Tableau I.2. Avantages et inconvénients de chaque famille de matériaux **[10].**

I.4.2. La ferroélectricité :

La ferroélectricité forme un sous-groupe de la pyroélectricité comme le montre la figure I.3. La direction de polarisation d'un cristal ferroélectrique varie en fonction du champ électrique extérieur, elle peut être simplement réorientée voire même s'inverser si le champ est suffisamment intense.

Les céramiques poly cristallines ferroélectriques sont composées de grains et de joints de grains. Un grain est composé de domaines séparés les uns des autres par des parois.

Chaque domaine peut avoir son axe de polarisation différemment orienté par rapport au domaine adjacent, donc, comme la répartition des domaines est aléatoire, le matériau est globalement non polaire.

La structure cristalline fait que l'angle entre la polarisation microscopique de chaque domaine ne peut prendre que quatre valeurs : *71°*, *90°*, *109°* et *180°* **[8]**.

I.4.3. Polarisation:

La plupart des matériaux ferroélectriques sont fabriqués sous forme de céramique poly-cristalline mais il est possible d'obtenir ces matériaux sous forme de monocristaux, qui sont par ailleurs extrêmement fragiles.

Les céramiques poly cristallines sont formées de grains et de joints de liaison. Chaque grain est divisé en domaines dont les dipôles sont orientés aléatoirement en l'absence de champ électrique. En appliquant un champ électrique intense dit de polarisation les domaines s'orientent parallèlement à ce champ et conservent cette direction par la suite même en l'absence de champ, figure (I.4), le cristal est alors polarisé. Cette classe de cristaux est dite ferroélectrique.

Pour des raisons énergétiques chaque grain est divisé en domaines au sein desquels les dipôles sont orientés dans la même direction.

Deux domaines adjacents possèdent des directions de polarisation différentes définies par la symétrie cristalline et sont séparés par une frontière appelée « mur de domaine ». Cette zone de transition ne détruit pas la cohérence du réseau cristallin. Sous sollicitation électrique ou mécanique, les murs de domaines se déplacent et leur mouvement est responsable de certaines pertes dans la céramique.

Cependant il existe des compositions (matériaux dopés) pour lesquelles les murs de domaines sont moins mobiles. Les polarisations spontanées des différents domaines sont orientées au hasard après frittage et le matériau n'a macroscopiquement aucun moment dipolaire électrique.

Pour que le matériau possède un moment dipolaire rémanent, il faut orienter ces domaines dans une direction donnée. On doit donc soumettre le matériau ferroélectrique à un champ électrique intense qui aligne préférentiellement dans sa direction la polarisation des domaines.

Les murs de domaines vont alors se déplacer, certains domaines vont croître en volume et d'autres disparaître avec l'augmentation du champ. Les dipôles se réorientent plus ou moins facilement suivant leur configuration initiale **[6]**.

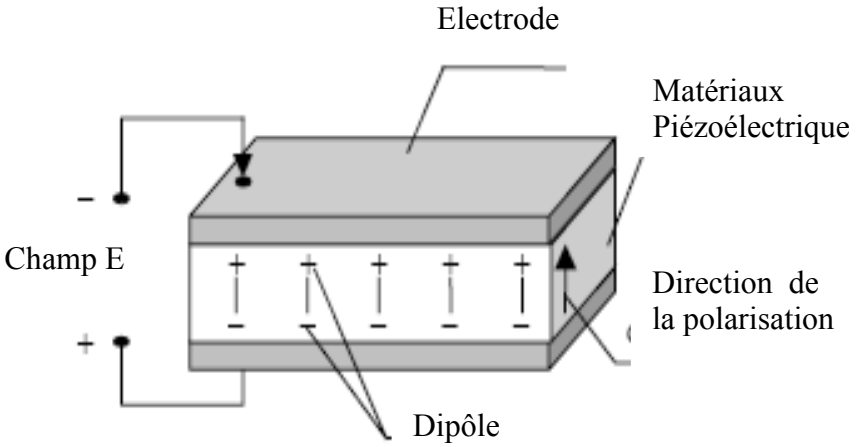


Figure I.4 : Polarisation des céramiques piézoélectriques **[6]**.

Dans les matériaux de structure perovskite, les domaines à *180°* basculent complètement car le réseau ne subit pas de déformation structurale.

En revanche, les domaines à *71°*, *109°* et *90°* induisent des déformations importantes du réseau cristallin qui se traduisent par une réorientation partielle de ces domaines.

La figure (I.5) représente le phénomène de réorientation des domaines lors de la polarisation d'une céramique ferroélectrique.

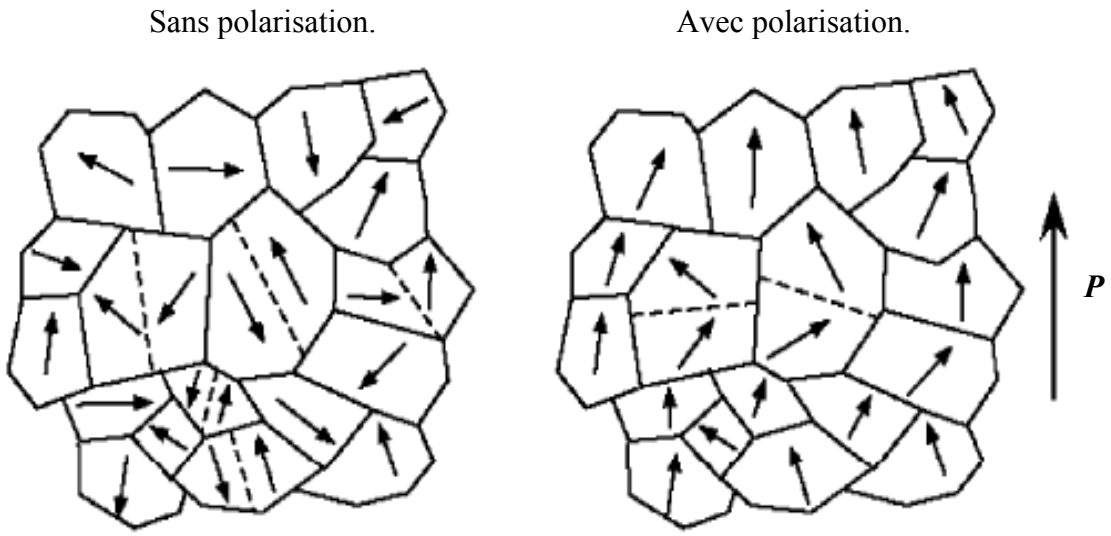


Figure I.5 : Evolution des orientations des domaines ferroélectriques sous l'effet d'un champ électrique **[10]**.

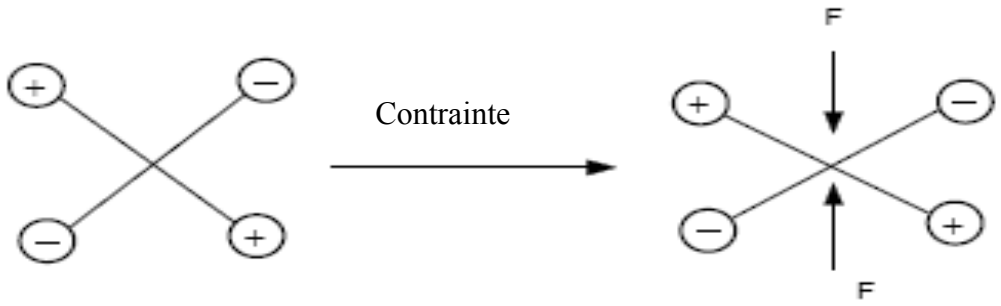
I.4.3.1. Symétrie et piézoélectricité:

Le matériau ainsi polarisé devient anisotrope et possède une symétrie radiale dans le plan perpendiculaire à la polarisation.

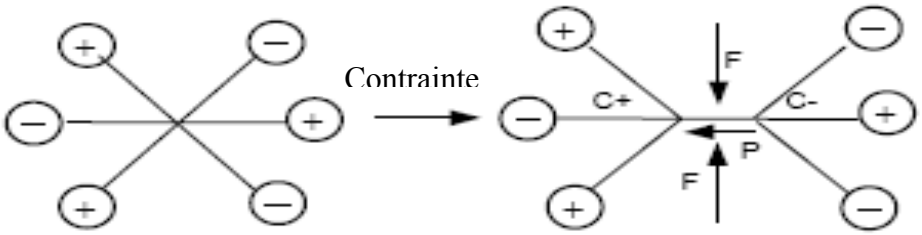
A l'échelle cristalline, la piézoélectricité se manifeste par une polarisation de la maille. A l'échelle de la maille, elle résulte de la création de dipôles internes par séparation du centre de gravité des charges positives et de celui des charges négatives suite aux déformations sous l'action de contraintes.

Les propriétés de symétrie des cristaux ont une importance fondamentale pour l'existence ou non de la piézoélectricité.

Tout corps présentant un centre de symétrie ne peut pas être piézoélectrique alors que les cristaux ne possédant pas de centre de symétrie peuvent l'être, figure (I.6) **[8]**.



Corps centrosymétrique.



Corps non centrosymétrique.

Figure I.6 : Représentation schématique de l'apparition de la piézoélectricité **[8]**.

I.4.3.2. Cycle d'hystérésis:

Lorsque le champ électrique est nul, la maille déformée a tendance à revenir à sa forme initiale. Les dipôles se réorientent suivant leur direction initiale plus ou moins rapidement faisant apparaître une hystérésis. La polarisation *P* est alors une fonction non linéaire du champ électrique extérieur *E,* figure (I.7). Pour des valeurs de champ importantes, la polarisation est saturée à la polarisation spontanée ±*Ps*.

Lorsque *E* est ramené à zéro, une polarisation rémanente ±*Pr* subsiste dans les cristaux. Si *E* est égale à ±*Ec*, la polarisation rémanente est alors annulée.

Pour la plupart des matériaux ferroélectriques soumis à des sollicitations mécaniques, électriques ou thermiques répétées, les dipôles ne conservent plus leur orientation initiale au cours du temps.

La polarisation rémanente se modifie au cours du temps et décroît sensiblement suivant les conditions d'utilisation du matériau.

Cependant, dans le cas de solutions solides de *PZT*, la polarisation du matériau se stabilise vis à vis des sollicitations extérieures **[6]**.

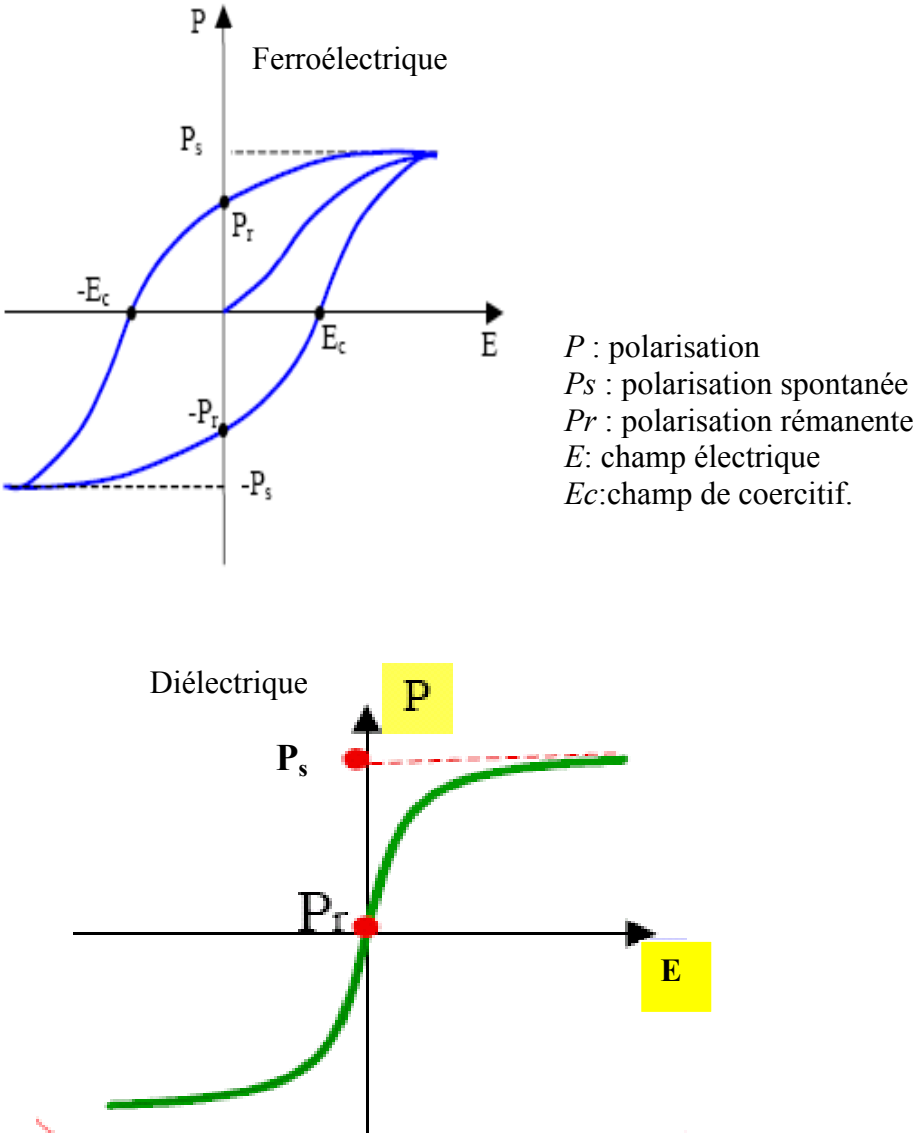


Figure I.7 : Cycle d'hystérésis *P = f(E)* d'un matériau ferroélectrique **[6, 8]**.

I.4.3.3. Vieillissement:

Les propriétés des matériaux ferroélectriques soumis à des sollicitations mécaniques, électriques ou thermiques répétées peuvent être modifiées et décroître sensiblement avec le temps. Ce phénomène appelé vieillissement est relié à la variation progressive de la configuration des murs de domaines avec le temps. Ces derniers se réarrangent dans une configuration plus stable qui minimise l'énergie de la céramique piézoélectrique.

Dans certains matériaux cela fait apparaître un champ interne E_i de direction opposée à l'axe de polarisation qui diminue sensiblement la polarisation rémanente **[6]**.

On exprime généralement la variation des propriétés piézoélectriques au cours du temps de la manière suivante :

$$X(t) = X(t_0) + A * ln(t/t_0) \quad \text{(I.1).}$$

Où :

t_0: est le point de départ de la mesure,

A_v: correspond à la vitesse de vieillissement

X: représente la grandeur piézoélectrique considérée.

I.4.4. Température de Curie:

La polarisation rémanente d'une céramique piézoélectrique décroît avec la température et s'annule au-dessus d'une température T_c appelée température de *Curie*. La figure I.8 montre l'évolution de la polarisation en fonction du champ et de la température.

Au-delà de cette température, le matériau piézoélectrique se trouve dans un état paraélectrique non polaire. Le passage polaire - non polaire correspond à une transition de phase.

La symétrie cristalline de la phase non polaire est toujours plus élevée que celle de la phase polaire. La permittivité diélectrique relative ε_r ($\varepsilon_r = \varepsilon / \varepsilon_0$) atteint une valeur maximale à la température de *Curie*. Au-dessus de cette température, la permittivité relative ε_r, mesurée sous champ faible le long de l'axe de polarisation, suit une loi de *Curie Weiss* **[8]** :

$$\varepsilon_r - 1 = (C_c / T - T_0) \quad \text{(I.2).}$$

Où :

T_0 : est la température de *Curie Weiss* en (K) qui traduit les interactions entre moments dipolaires dans le matériau.

T : la température absolue (K).

C_c : la constante de *Curie*.

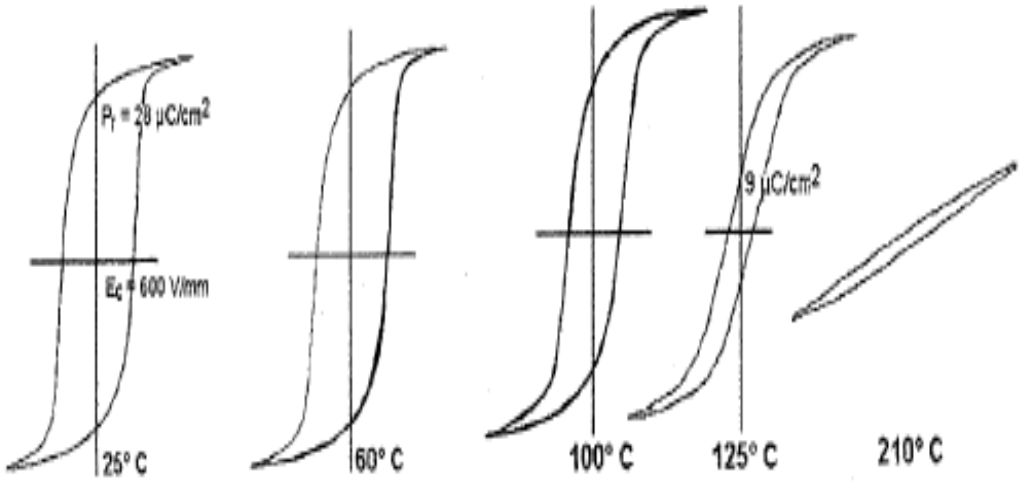


Figure I.8 : Evolution des cycles d'hystérésis *P = f(E)* avec la température pour $Pb_{0,85}Ba_{0,15}(Zr_{0,56}Ti_{0,42}Nb_{0,02})O_3$. **[8]**.

I.5. Propriétés:

I.5.1. Conversion électromécanique:

Les propriétés des matériaux piézoélectriques changent sous l'influence de la température, de la contrainte et du champ électrique. Les variations se traduisent par des effets mécaniques, électriques ou thermiques.

Les différentes relations thermodynamiques réversibles qui existent entre les propriétés électriques, thermiques et mécaniques d'un cristal sont représentées par le diagramme symbolique de la figure (I.9) **[6,8]**.

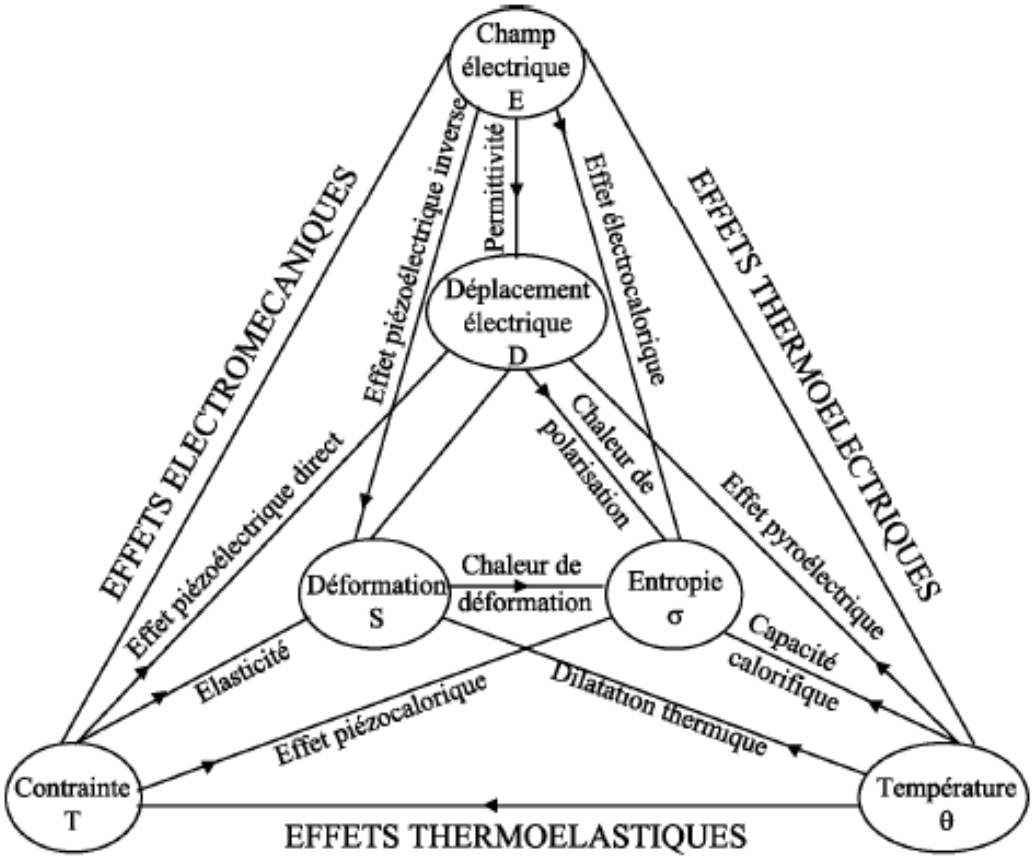


Figure I.9 : Relations entre les propriétés thermiques, électriques et mécaniques d'un cristal **[6, 11]**.

I.5.2. Equations Piézoélectriques:

La piézoélectricité est le résultat d'un couplage entre l'énergie électrique et l'énergie mécanique d'un matériau. Lorsque l'effet pyroélectriques est négligeable, les équations piézoélectriques relient une variable mécanique, déformation *S* ou contrainte *T*, et une variable électrique, induction électrique *D* ou champ électrique *E*.

Elles illustrent le phénomène de couplage entre l'énergie élastique et l'énergie électrique du matériau piézoélectrique. Ainsi nous obtenons un système linéaire de huit équations tensorielles, tableau (I.3).

Trois types de coefficients interviennent:
• Des coefficients purement électriques,
• Des coefficients purement mécaniques,
• Des coefficients mixtes qui traduisent le couplage entre les grandeurs électriques et les grandeurs mécaniques **[6, 8,12]**.

Variables independents	Grandeurs électriques	Grandeurs mécaniques
E, T	$D = dT + \varepsilon^T E$	$S = s^E T + d^t E$
D, T	$E = \beta^T D - gT$	$S = s^D T + g^t E$
E, S	$D = \varepsilon^S E + eS$	$T = c^E S - e^t E$
D, S	$E = \beta^S D - hS$	$T = c^D S - h^t D$

Tableau I.3. Equations de la piézoélectricité **[6, 9]**.

Où :

X^t est la transposée de la matrice X.
X^E indique que la grandeur X est considérée à champ électrique E constant.
X^D indique que la grandeur X est considérée à induction électrique D constante.

Le tableau (I.4) est un glossaire des symboles utilisés dans les différentes équations et matrices.

Abbreviations	Dénominations.	Types de grandeur.	Matrices.
D	Déplacement électrique ou induction *(C/ m²)*.	Electrique	(3, 1)
E	Champ électrique *(V/m)*.		(3, 1)
ε	Permittivité électrique *(F/m)*.		(3, 3)
β	Constante d'imperméabilité diélectrique *(m/F)*.		(3, 3)

S	Déformation relative.	Mécanique.	(6, 1)
T	Contrainte (N/ m^2).		(6, 1)
s	Compliance ou susceptibilité élastique (m^2/N).		(6, 6)
c	Raideur ou constante élastique (N/m^2).		(6, 6)
d	Constante piézoélectrique qui traduit la proportionnalité entre la charge et la contrainte à champ nul ou constant (C/N).	Piézoélectrique	(3, 6)
e	Constante piézoélectrique qui traduit la proportionnalité entre la charge et la déformation à champ nul ou constant (C/m^2).		(3, 6)
g	Constante piézoélectrique qui traduit la proportionnalité entre la contrainte et le champ à induction nulle ou constant (m^2/C).		(3, 6)
h	Constante piézoélectrique qui traduit la proportionnalité entre la déformation et le champ à induction nulle ou constant (m/V).		(3, 6)

Tableau I.4. Glossaire des symboles dans la piézoélectricité **[6]**.

I.5.2.1. Coefficients Piézoélectriques:

On dénombre quatre modules piézoélectriques différents forment une matrice de 3 lignes et de 6 colonnes (tenseur d'ordre 3) et traduisant le couplage entre les grandeurs électriques et les grandeurs mécaniques. Des équations précédentes, nous pouvons déterminer les relations entre les coefficients piézoélectriques **[6,10]**.

$$
\begin{aligned}
d_{mi} &= \varepsilon^{T}_{nm} g_{m} = e_{mj} s^{E}_{ji} \\
g_{mi} &= \beta^{T}_{nm} d_{m} = h_{mj} s^{D}_{ji} \\
e_{mi} &= \varepsilon^{S}_{nm} h_{m} = d_{mj} c^{E}_{ji} \\
h_{mi} &= \beta^{T}_{nm} e_{m} = g_{mj} c^{D}_{ji}
\end{aligned}
\qquad \text{Avec } m, n = 1 \text{ à } 3 \text{ et } i, j = 1 \text{ à } 6.
$$

Des considérations de symétrie du milieu cristallin permettent de réduire le nombre des coefficients. Ainsi pour une céramique polarisée suivant l'axe *3*, la matrice des coefficients piézoélectriques (identique pour *d, e, g* et *h*) s'écrit :

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

La matrice des coefficients élastiques (identique pour C^E, C^D, S^E et S^D) s'écrit :

$$\begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{11} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{13} & c_{13} & c_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{c_{11}-c_{12}}{2} \end{bmatrix}$$

La matrice des coefficients diélectriques (identique pour ε^S, ε^T, β^S, et β^T) s'écrit :

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{11} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{33} \end{bmatrix}$$

Comme l'indique la figure (I.10), les indices *1, 2, 3* correspondent respectivement aux directions normales aux plans *YOZ*, *XOZ* et *XOY* et les indices *4, 5, 6* aux directions tangentielles à ces mêmes plans **[13, 14]**.

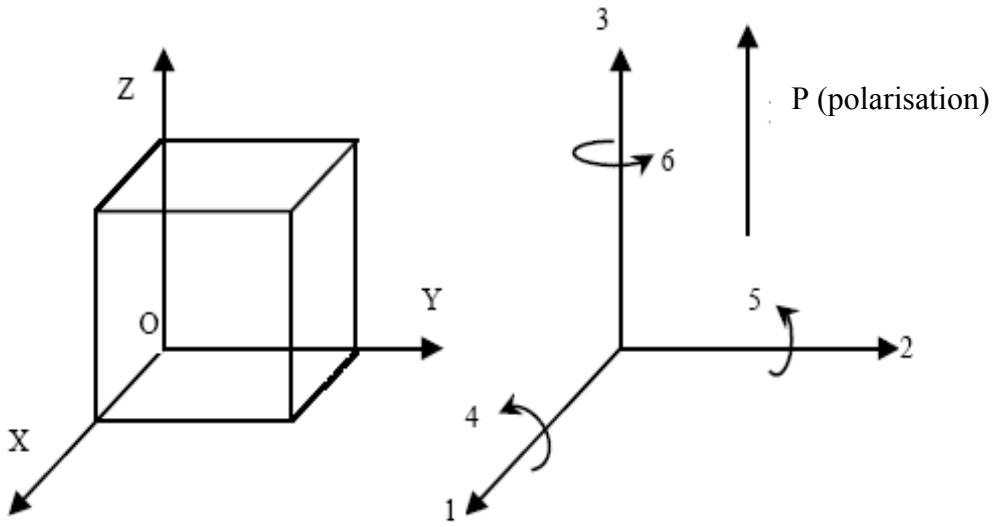
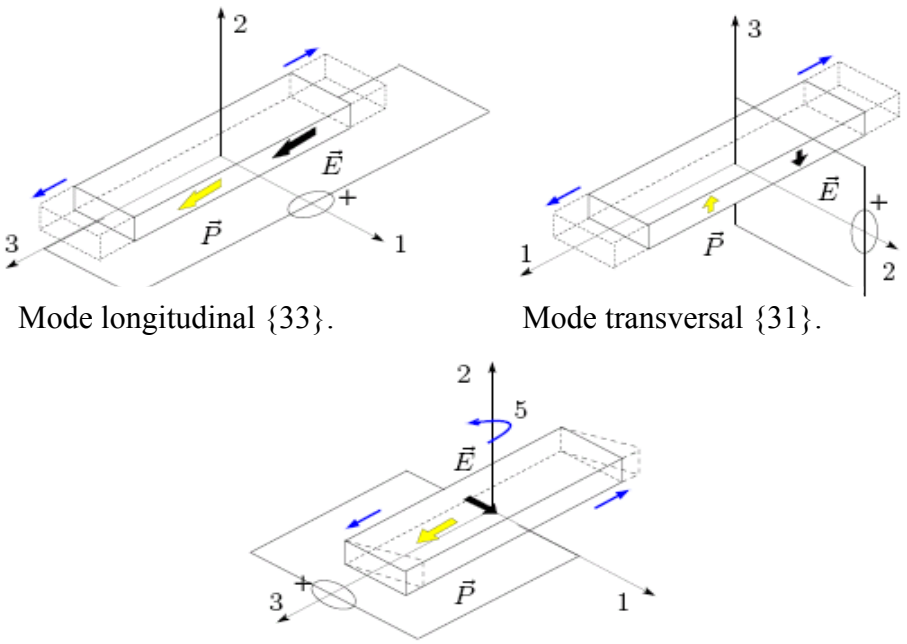


Figure I.10 : Définition des directions dans un milieu piézoélectrique.

I.5.2.2. Quantification du couplage:

A chacune des fréquences de résonance d'une céramique piézoélectrique est associé un mode de vibration. La nature de ces modes, autrement dit la distribution spatiale de la géométrie considérée, dépend de ses dimensions, de la direction du champ d'excitation *E* et du vecteur de polarisation *P* **[8]**. Les principaux modes sont illustrés dans la figure (I.11) **[4]**.



Mode longitudinal {33}. Mode transversal {31}.

Mode de cisaillement {15}.

Figure I.11 : Modes de vibrations fondamentaux d'une céramique piézoélectrique **[4]**.

I.5.2.3. Coefficient de couplage électromécanique:

Les équations générales de la piézoélectricité permettent de déterminer l'importance du couplage élasto- électrique. Cependant du fait de leur caractère tensoriel elles sont très lourdes et difficiles à utiliser. En pratique, on préfère caractériser le couplage par un scalaire que l'on appelle coefficient de couplage. Ce paramètre tient compte à la fois des propriétés élastiques, diélectriques et piézoélectriques du matériau.

Il définira l'aptitude du matériau utilisé à transformer l'énergie électrique emmagasinée en énergie mécanique (ou réciproquement).

La définition du coefficient de couplage en accord avec les normes *I.R.E* (**I**nstitute of **R**adio **E**ngineering), est donnée par **[8,13]** :

$$k = \frac{U_m}{\sqrt{U_E * U_D}} \qquad \text{(I.3).}$$

Avec : U_E : l'énergie élastique
U_D : énergie diélectrique
U_m : énergie d'interaction, ou mutuelle, élasto électrique

Ce coefficient est appelé coefficient de couplage statique, il est obtenu à partir d'une étude thermodynamique du système considéré comme linéaire en négligeant les effets thermiques. On peut aussi quantitativement écrire :

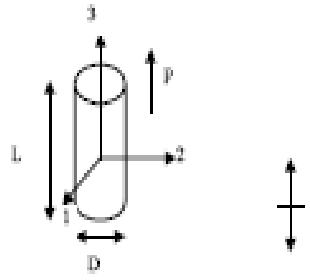
k^2 = (Énergie transformée) / (Énergie fournie)

Suivant la forme de l'échantillon et le mode de vibration, ce coefficient de couplage varie. Le tableau (I.5) présente, selon le mode de vibration les expressions qu'il peut prendre et les constantes mesurées **[15]**.

I.5.2.4. Coefficient de surtension mécanique:

Le coefficient de surtension mécanique appelé aussi facteur de qualité mécanique mesure les pertes mécaniques dans la céramique, il est défini par **[8]** :

$$Q = 2\pi \frac{\text{Énergie maximum emmagasinée pendant une période.}}{\text{Énergie dissipée pendant une période.}}$$

Echantillon.	Déformation.	Dimensions.	Constantes mésurées.	
		I.R.E usuelles en *mm*	Piézoélectriques et diélectriques.	Mécaniques.
Bareau.		$D < \frac{L}{5}$ $L = 15$ $D = 6.35$	k_{33} d_{33} g_{33} ε_{33}^{T} ε_{33}^{S}	S_{33}^{D} S_{33}^{E} Q_{33}

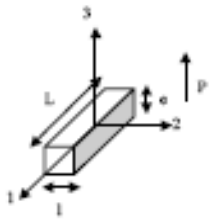
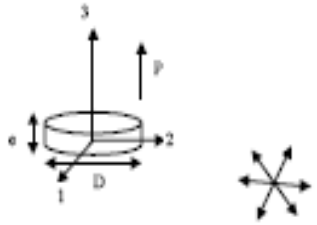
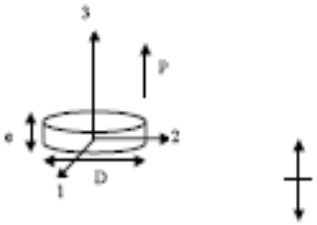
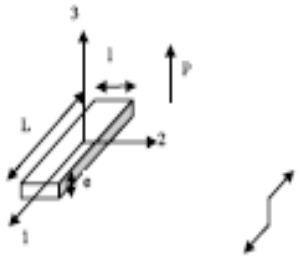
Latéral		$I < \frac{L}{3}$ $e < \frac{L}{5}$ $L = 25,$ $I = 5,$ $e = 5$	k_{33} d_{31} g_{31}	S_{11}^{D} S_{11}^{E} Q_{31}
Radial		$D > 5e$ $D = 20,$ $e = 2$	k_p k_{31} ε_{33}^{T}	σ^{E} S_{12}^{E} Q_p
Epaisseur		$D >> e$ *idem*	k_t e_{33} h_{33} ε_{33}^{S}	c_{33}^{D} c_{33}^{E} Q_t
Cisaillement		$L > 8e$ $L = 10,$ $I = 5,$ $e = 1.$	k_{15} d_{15} g_{15} ε_{11}^{T} ε_{11}^{S}	c_{55}^{D} c_{55}^{E} s_{55}^{D} s_{55}^{E} Q_{15}

Tableau I.5. Echantillons pour caractérisation des modes fondamentaux **[15]**.

Dans la pratique on se fixe un système d'axes qu'on appelle *1, 2,3* dont la direction de l'axe *3* est prise parallèlement à la direction de polarisation, donc elle est fixée une fois qu'on construit le piézo-électrique donc :

- d_{33}**:** déformation en longitudinal suivant la direction de polarisation suite à l'application d'un champ électrique suivant la même direction ; cela correspond au déplacement électrique suivant la direction de polarisation due à un effort appliqué suivant la même direction.
- d_{31}**:** déformation en transversal suivant la direction orthogonale à l'axe de polarisation suite à l'application d'un champ électrique ayant la direction de l'axe de polarisation
- d_{15}**:** déformation en cisaillement suivant la direction de l'axe de polarisation, suite à l'application d'un champ électrique suivant la direction perpendiculaire.

Lorsque le piézoélectrique travaille en traction ou en compression les électrodes sont placées orthogonalement à ces axes, lorsqu'il travaille en cisaillement les électrodes sont parallèles à l'axe.

Si on considère les constantes de l'effet piézoélectrique d_{ij} on voit qu'elles sont *100* fois plus élevées pour les piézo céramiques que dans le cas du quartz **[6, 8]**.

$$\left(d_{ij}\right)_{quartz} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0.727 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.727 & 0 & 0 \\ -2.31 & -2.31 & 4.62 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.10^{-12} C/N$$

$$\left(d_{ij}\right)_{céramique} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 584 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 584 & 0 & 0 \\ -171 & -171 & 374 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.10^{-12} C/N$$

Les permittivités relatives ε_r sont *400* fois plus élevées que dans le cas du quartz :

$$\left(\varepsilon_{rij}\right)_{quartz} = \begin{bmatrix} 4.52 & 0 & 0 \\ 0 & 4.52 & 0 \\ 0 & 0 & 4.68 \end{bmatrix} \qquad \left(\varepsilon_{rij}\right)_{céramique} = \begin{bmatrix} 1730 & 0 & 0 \\ 0 & 1730 & 0 \\ 0 & 0 & 1700 \end{bmatrix}$$

Cela veut dire que la vitesse de réponse augmente en utilisant les céramiques piézo-électriques plutôt que le quartz, d'ailleurs, on peut améliorer les caractéristiques des céramiques, en ajoutant convenablement d'autres éléments dans leur structure ; donc c'est cela qu'on utilise le plus souvent en instrumentation.

Remarques:

1. Si on néglige les effets thermiques issus de la variation soit de la température soit du flux thermique ; si on travaille à $T = cte$ on va obtenir des coefficients isothermes ; si on travaille à $Q = cte$ on va obtenir des coefficients adiabatiques, qui sont différents des précédents.

2. Ce que l'on vient d'écrire sont des relations constitutives linéarités dans lesquelles on n'exprime pas les non linéarités caractérisant toute céramique piézoélectrique, ainsi que les aspects de dissipation.
En général, quand même, tout matériau piézoélectrique est caractérisé par :

- Une forte anisotropie.
- Une rigidité mécanique élevée, ce qui donne un bon comportement dynamique.
- La possibilité d'application en cryogénique car le principe de fonctionnement se base sur un champ électrique inter atomique, non affecté par la température.
- Un mauvais fonctionnement statique car il y a toujours des courants de fuite ; le matériau piézoélectrique se comporte comme une capacité chargée, mais il se décharge inévitablement soit au travers du matériau même soit par l'électronique associée.

L'effet piézo-électrique est complètement réversible :
L'effet inverse est utilisé par les actionneurs, tandis que l'effet direct est utilisé par les capteurs en ce qui concerne l'instrumentation, la piézoélectricité trouve une application dans :

- Les capteurs de force et de pression.
- Les accéléromètres.
- Les jauges de contrainte.
- L'électronique en tant qu'oscillateurs ayant une fréquence de résonance bien définie.
- Générateurs et récepteurs d'ultrasons, ondes de choc, impulsions
- Nano moteurs, nano positionneurs, systèmes optiques actifs

Les caractéristiques de certaines céramiques piézoélectriques couramment utilisées sont résumées dans le tableau suivant tableau (I.6), le PXE52 et le PXE71 sont des céramiques *PZT* obtenues par agglomération des poudres et produites par *Philips*, générant respectivement des déformations longitudinales/transversales et de cisaillement ; *PVDF* représente les polymères piézoélectriques qui sont en général moins efficaces **[16]**.

Cela montre les constantes de charge d_{ij} et les coefficients de flexibilité s_{ij} pour chaque matériau piézoélectrique, les cases en gris correspondent aux modes de fonctionnement typiques.

Mode	Paramètres	Unité.	Céramiques		Polymère.
			PXE52	*PXE71*	*PVDF*
Longitudinal	d_{33}	10^{-12} m/V	*580*	*0*	*17.5*
Transversal	d_{31}	10^{-12} m/V	*-270*	*-147*	*6.5*

I.6. Les céramiques ferroélectriques de structure perovskite.

I.6.1. Cas particulier des céramiques *PZT* :

Le matériau ferroélectrique de structure perovskite le plus connu est le titanate de barium *($BaTiO_3$)*. Sa très grande permittivité fut mise en évidence en *1941* par *Thurnauer* et il fut reconnu comme étant ferroélectrique en *1945*. Les zircono titanates de plomb (*PZT*) apparus en *1954* constituent maintenant la première grande source de ferroélectriques de structure perovskite.

Les matériaux *PZT*, de formule générale $PbZr1\text{-}xTixO_3$ (avec $0 < x < 1$), cristallisent dans la structure perovskite ABO_3. Dans la forme la plus simple, l'arrangement atomique peut être représenté par maille cubique.

Les céramiques de *PZT* n'ont pas toutes les mêmes propriétés; elles peuvent se classer en deux grands groupes, les *PZT* doux et les *PZT* durs, en fonction des substituant des sites *A* et *B* formant la maille de *PZT*.

Dans les *PZT* doux, les substituant des sites *A* et *B* du *PZT* sont des ions donneurs par rapport au Pb^{2+}, Zr^{4+}, Ti^{4+}, ces changements induisent la création de lacunes cationiques.

D'un point de vue piézoélectrique, les *PZT* doux présentent de fortes pertes diélectriques, une grande permittivité et un coefficient de couplage élevé. En revanche, on observe une diminution du facteur de qualité mécanique et de la température de *Curie* et du champ coercitif.

En ce qui concerne les *PZT* durs, les substituant communément employés sont les ions Na^{+}, K^{+}, $Fe^{2+/3+}$, $Mn^{2+/3+}$, Ni^{2+}. Ces ions sont des accepteurs et provoquent la création de lacunes d'oxygène et une contraction de la maille perovskite.

Ceci provoque l'augmentation du facteur de qualité mécanique et du champ coercitif, mais abaisse la permittivité, les pertes diélectriques, le coefficient de couplage et la température de *Curie*. De plus, la taille des grains est plus faible, il faut également remarquer la présence d'un

champ interne dans le matériau. La polarisation est donc plus difficile car le mouvement des domaines est réduit sous l'application d'un champ électrique **[6]**.

I.6.2. Description de la structure perovskite :

La formule générale d'une perovskite est ABO_3, où la valence des cations *A* est comprise entre *+1* et *+3* et la valence des cations *B* entre *+3* et *+6*. Dans le cas d'une symétrie cubique, les cations *A* sont situés aux sommets du cube, les cations *B* au milieu du cube et les atomes d'oxygène au centre des faces. La structure perovskite est ainsi constituée d'un réseau d'octaèdres BO_6 reliés entre eux par les sommets et entourés par les cations *A*.

La figure I.12 est une représentation de la structure perovskite cubique avec le plomb à l'origine **[8, 10, 12]**.

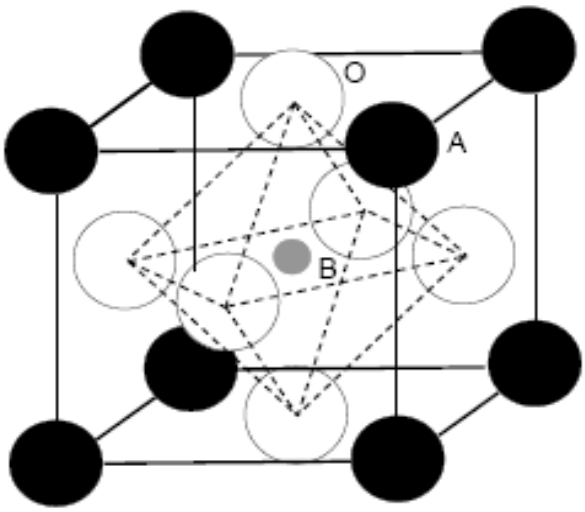


Figure I.12 : Structure perovskite cubique du *PZT* **[10]**.

I.6.3. Critères de stabilité de la structure perovskite :

Il existe deux paramètres principaux qui rendent compte de la stabilité de la structure perovskite. Le premier est le facteur de tolérance *t* défini par *Goldschmit* :

$$t = \frac{Ra + Ro}{\sqrt{2}(Rb + Ro)} \qquad \text{(I.4).}$$

Avec *Ra, Rb* et *Ro* les rayons ioniques respectifs des cations *A*, *B* et de l'oxygène.

Le facteur de tolérance *t* quantifie globalement la compacité de la perovskite et la liberté de mouvement des cations *A* et *B*. Si *t* est compris entre 0.88 et 1.09, la structure perovskite est stable et elle l'est d'autant plus que *t* est proche de 1. Le second paramètre qui définit un critère de stabilité est l'ionicité de la liaison anioncation. Le caractère ionique d'une composition ABO_3 est quantifié d'après l'échelle de *Pauling* à partir de la différence d'électronégativité **[8]**.

$$\Delta E = \frac{(X_{A-O} + X_{B-O})}{2} \qquad \text{(I.5).}$$

Où : X_{A-O} et X_{B-O} sont respectivement les différences d'électronégativité entre *A* et *O*, et *B* et *O*. La structure perovskite est d'autant plus stable que les liaisons mises en jeu présentent un fort caractère ionique. Ainsi, les perovskites à base de plomb de type covalent sont moins stables que des perovskites plutôt ioniques comme B_aTiO_3 ou S_rTiO_3.

I.7.Elaboration :

I.7.1. Préparation de la céramique :

La fabrication de matériaux piézo-électriques est réalisée à partir de poudres (si elle est réalisée en phase solide). Outre la phase de polarisation déjà décrite, une phase de frittage, visant à souder entre eux les grains, se fait sous contraintes axiales afin d'améliorer la tenue mécanique et de diminuer la porosité **[3]**. Les matériaux se conditionnent sous forme de film, de disque, de bâtonnet de section carrée ou circulaire. Leur cycle de fabrication par voie solide est illustré dans la figure (I.13).

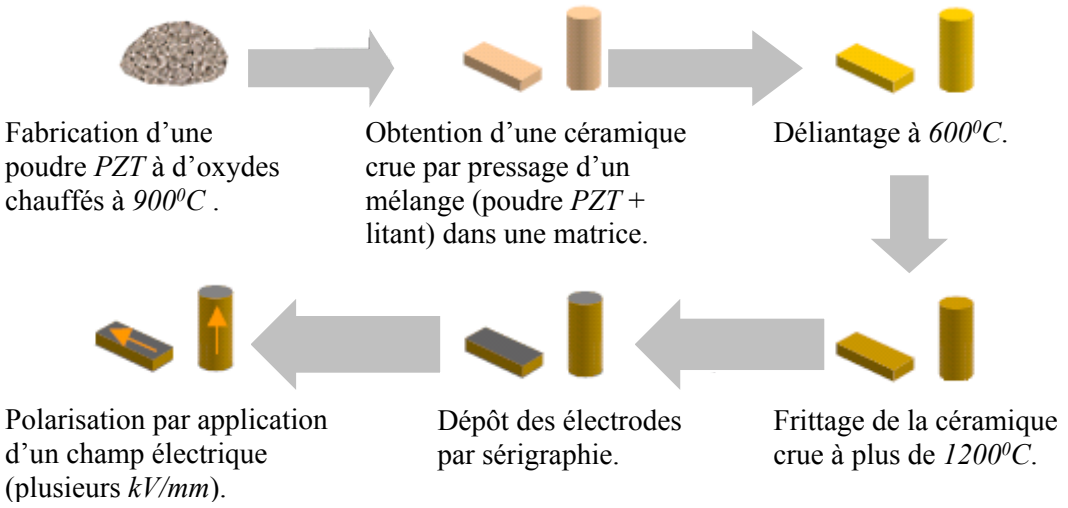


Figure.I.13. Cycle de fabrication des céramiques *PZT* par voie solide. **[17]**.

Parmi ces matériaux de synthèse, les titanozirconates de plomb (*PZT*) sont les plus répandus. Ils ne deviennent piézoélectriques qu'après l'étape finale de polarisation qui consiste en l'application d'un champ électrique de valeur élevée dans le but d'orienter les différents vecteurs de polarisation dans la même direction **[8]**.

I.7.2. Four utilisé lors de la croissance cristalline :

Le four utilisé lors des différentes croissances cristallines est un four de trois zones (Société

*GERO, Allemagn*e) dont la température maximale d'utilisation est *1600°C*, figure (I.14).

Les résistances chauffantes sont protégées par un tube de travail en alumine divisé en quatre parties ce qui permet des gradients thermiques assez élevés (de l'ordre de *30* à *50 °C/cm*) par l'utilisation des anneaux réfractaires. Les tirages de cristaux nécessitent entre *8* et *16* jours suivant le type et les paramètres de croissance.

Les réglages du four sont déterminés à partir de la température de fusion donnée par : *ATD* (Analyse Thermique Différentielle), et le creuset est placé dans le four de telle sorte que le point de cristallisation (interface liquide solide) corresponde au fort gradient (le gradient mesuré est d'environ *30* à *50 °C/cm*) **[8, 15]**.



Figure.I.14. Four de croissance cristalline (Société *GERO, Allemagne*) **[15]**.

Les paramètres thermiques et mécaniques du four sont donnés :

- Température maximale est: 1600^0C.
- Vitesse de chauffe est: de (*1 – 300°C/h*).
- Translation lente est: de (*0,1 – 3 mm/h*).
- Translation rapide est: de (*1 – 100 mm/h*).
- Rotation rapide est: de (*0 – 20 tr/min*).

I.8. Applications des matériaux piézoélectriques:

Depuis leur découverte, le nombre d'applications utilisant des matériaux piézoélectriques a été en continuelle augmentation.

D'abord sous forme massive puis sous forme de couches de plus en plus minces, leurs propriétés n'ont eu de cesse d'intéresser les chercheurs **[6, 15]**.

- Applications basées sur l'effet direct:

- Microphone
- Hydrophone
- Capteur de choc
- Accéléromètres
- Bouton poussoir
- Allumage
- Capteur de pression ou de contraintes

- Applications basées sur l'effet inverse:

- Haut-parleur
- Buzzer
- Transducteur sonar
- Nébuliseur
- Nettoyage par ultra son
- Moteurs ultrasonores
- Relais
- Micro positionnement
- Ajustement laser
- Imprimante à jet d'encre
- Dispositifs acousto-optiques
- Pompe piézoélectrique
- Bistouri piézoélectrique

- Applications basées sur les deux effets:

- Transducteur d'ultrasons pour diagnostic médical (échographie)
- Détecteur de proximité ou de présence
- Mesure de distances ou de débits
- Gyroscope
- Filtre fréquentiels (ondes volumiques *SAW*)
- Transformateur piézoélectrique.

Une présentation non exhaustive des différentes applications des céramiques de *PZT* est présentée sous une forme de tableau (I.7) suivant **[6]**:

	Proprieties de *PZT*	Définitions	Applications.	Exemples.
		Pouvoir transformer une énergie mécanique en énergie électrique pour les applications utilisant l'effet direct.	Générateurs haute-tension	- L'allume-gaz. - Les actionneurs de lance-roquettes.
				- Les amerces.
			Emission d'ultrasons et	-Sonars -Soudure

I.9. Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons vu l'importance technologique des matériaux piézoélectriques, qui mobilisent les chercheurs depuis des siècles. Nous avons présenté les notions de bases du point de vue des sciences des matériaux qui nous ont permis de comprendre comment la piézoélectricité s'insère dans l'ensemble plus vaste de la physique moderne des solides.

Cette étude nous a permit aussi de conclure, que les matériaux piézoélectriques qui nous intéressent dans la construction électrique doivent posséder simultanément plusieurs caractères exceptionnels.

Les nombreux exemples évoqués au cours de ce chapitre montrent l'intérêt que représente le *PZT* sous forme de céramique massive.

De plus, il est possible d'adapter ce matériau selon la demande en fonction des différents substituant utilisés (une forte constante diélectrique ou un coefficient de couplage important ne s'obtiennent pas forcément avec la même céramique).

Le *PZT* est actuellement l'un des meilleurs candidats pour toutes les applications nécessitant une céramique massive comme par exemple pour les applications médicales ou la maîtrise de petits déplacements en mécanique ou dans le domaines aéronautique surtout la limitation des bruits ou des vibrations.

La suite naturelle de ce genre de développement est une réduction des dimensions et des coûts de fabrication. C'est pourquoi son intégration en films minces sur silicium ouvre au *PZT* le champ d'application des micros capteurs et micro actionneurs.

Dans cette optique, il est donc important de faire des gros efforts de recherche sur ce matériau en film mince et apporter de nouveaux outils de caractérisation et d'intégration des films de *PZT* sur silicium.

Nous avons abordé de manière simplifiée quelques aspects de la piézoélectricité et les différents domaines d'application, et son utilité importante dans le micro déplacement (capteur ou actionneur).

Chapitre II

Généralité sur les transducteurs piézoélectriques

II.1. Introduction:

Le premier brevet concernant les actionneurs piézoélectriques fut déposé en *1942* par *Williams* et *Brown*. Les auteurs proposaient la rotation d'une roue actionnée par les vibrations piézoélectriques d'un barreau. Cependant, sa réalisation n'a pu être entreprise à l'époque en raison des limitations des matériaux piézoélectriques et de l'électronique d'alimentation. C'est à la suite des progrès de l'électronique de puissance et de la science des matériaux que le premier moteur piézoactif fut conçu dans les années *70* par *Lavrinenko* et *Nekrasov*, aboutissant à un brevet en *1983* **[18]**.

Les actionneurs piézoélectriques représentent aujourd'hui une diversité considérable de structures et d'applications, tant les possibilités de combinaisons mécaniques sont grandes. Ils se retrouvent dans des secteurs aussi variés que la micro robotique (accessible grâce à la grande précision que permettent les faibles déformations), la médecine, l'automobile ou bien encore l'aéronautique. Néanmoins, les méthodes de conversion mécanique du mouvement vibratoire en mouvement uniforme restent sensiblement les mêmes.

II.2. Les principes d'actionnement:

Un actionneur peut être défini comme un convertisseur d'énergie qui transforme l'énergie d'une source externe en énergie mécanique dans un chemin contrôlable. Les entrés de ces actionneurs sont des grandeurs dépendant du type d'énergie utilisée. Pour un actionneur piézoélectrique, électromagnétique, et magnétostrictive la grandeur d'entrée est soit le courant, la charge ou la tension; elle est la pression ou le flux pour un actionneur hydraulique et la température pour un actionneur à alliage à mémoire de forme et à dilatation thermique.

Lorsqu'on considère les différentes possibilités d'actionnement on arrive à envisager dix façons de transformer l'énergie en mouvement, elles sont résumées ci-dessous (figure.II.1) **[16]**.

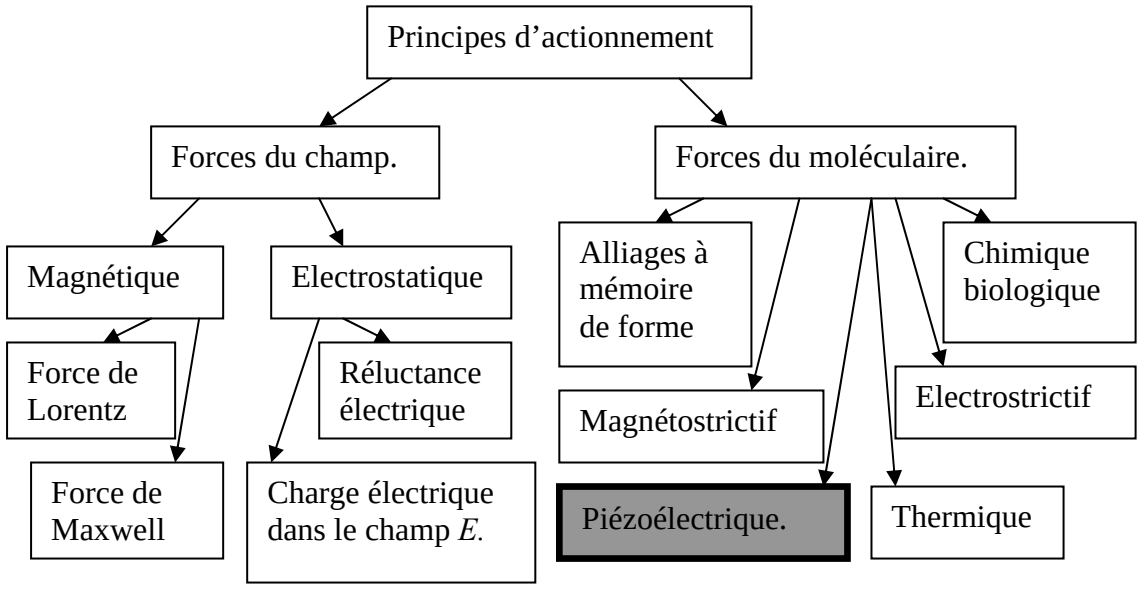


Figure.II.1. Principes d'actionnement **[16]**.

Nous présentons dans le tableau (II.1), quelques types d'actionneurs. Celles-ci permettant d'étudier les avantages et les inconvénients de chaque type d'actionneurs, en fonction du micro système dans lequel est utilisé.

Principes d'actionnement	Les avantages.	Les inconvénients.
Electromagnétique	-Une efficacité élevée en fonctionnement macroscopique et la possibilité d'opérations rapides. - Actionnement à distance sans contact.	- Les enroulements électromagnétiques *3D* sont difficiles à réaliser en microscopique qui réduit l'éfficience, donc il faut s'assurer que le courant qui induit le champ magnétique soit orthogonale à l'élément en mouvement. - Tout cela pose des problèmes lors de la réalisation par les techniques de microfabrication employant le silicium.
Thermomécanique	- Les déplacements dépendent des variations de température et la vitesse des opérations dépend des propriétés de transmission de la chaleur qui dépend du matériau employé. - Actionnement par contact.	- Les caractéristiques de l'actionneur varient selon le matériau employé, comme il faut refroidir le matériau lorsqu'on veut revenir aux conditions initiales qui sont favorisé par la réduction des volumes - Faible dimensions.
Hydrodynamique	La possibilité de mettre en mouvement un fluide sans besoin d'autres mécanismes en mouvement.	La dépendance des caractéristiques du fluide et la difficulté de miniaturisation.

Piézoélectrique	-Actionnement par contact avec une réponse très rapide. - Facile à contrôler au moyen du signal de tension. - les temps de réponse extrêmement limités, ce qui permet d'avoir presque toujours un comportement linéaire de l'actionneur (d'ordre de μm). - Une force maximum est produite au début de la déformation, ce qui donne une condition idéale pour l'actionnement. - la résistance à des pressions élevées. - Une proportionnalité entre déformation et tension appliquée. - Une vitesse de réponse élevée suite aux variations de tension, ainsi que des bonnes précision et répétabilité des déplacements. - la possibilité de les employer en même temps comme capteurs dans plusieurs applications, comme générateurs d'oscillations et oscillateurs eux-mêmes.	-L'effet hystérésis non linéaire qui limité l'employer dans les macro systèmes (d'ordre de *cm*) et forte saturation. - l'espace de travail fort limité (sous le champ électrique maximum applicable les matériaux piézo-électriques s'allongent en moyenne de *0.1%* de leur longueur, et des tensions importantes qui doivent être mises en jeux.

Tableau.II.1. Présentation des avantages et des inconvénients pour certains principes d'actionnement **[16]**.

D'après les facteurs mis en évidence ci-dessus, on voit que le choix du principe d'actionnement dépend :

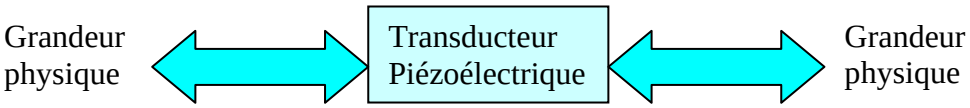
- des dimensions du dispositif à réaliser.
- du temps de réponse souhaité.
- de la puissance maximum qu'on peut fournir.
- de la force et du couple à développer en fonction du déplacement.

D'après le tableau (II.1), on voit que dans les cas des dispositifs électromagnétiques et piézoélectriques, qu'une tension d'activation de *70* à *100V* est nécessaire. La force générée est directement proportionnelle à la tension (donc une bonne efficience), une consommation relativement faible et une vitesse de réponse élevée. Par contre dans le cas des dispositifs thermomécaniques et hydromécaniques, la performance dépend beaucoup de la température ambiante et de la tendance à la dissipation de la chaleur. Donc il faut prévoir :
- L'isolation du système, ce qui entraîne l'augmentation des coûts et de l'encombrement.
- l'évacuation de la chaleur lors de l'actionnement pour pouvoir effectuer des cycles, mais cela implique, quand même, des cycles lents.

L'actionnement électromagnétique est préférable lorsqu'on a besoin de forces agissant à distance, donc sans contact, par contre on préfère l'actionnement piézoélectrique, basé sur le contact et le couplage électrique, pour toute application où la consommation de puissance est à limiter et la rapidité de réponse fondamentale.

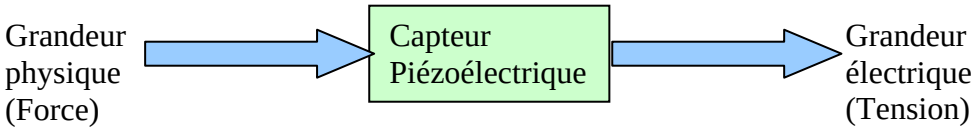
II.3. Le principe de fonctionnement d'un transducteur piézoélectrique :

Un transducteur piézoélectrique est un élément qui convertit une grandeur physique en une autre grandeur physique (soit un capteur ou actionneur ou les deux même).



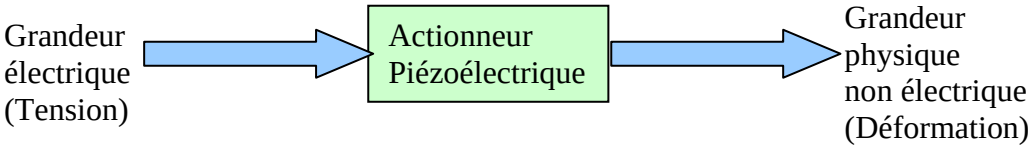
II.3.1. Le principe de fonctionnement d'un capteur piézoélectrique :

Un capteur piézoélectrique est un élément qui convertit une grandeur physique (force, contrainte…etc.) en une autre grandeur électrique (tension), avec la mesure de cette dernière qui est produite par la contrainte appliquée.



II.3.2. Le principe de fonctionnement d'un actionneur piézoélectrique :

Un actionneur piézoélectrique est un élément qui convertit une grandeur électrique (tension, courant) en une autre grandeur physique non électrique (déformation) ; cette dernière est produite par la tension appliquée.



II.4. L'actionneur piézoélectrique:

Il est réalisé à partir de matériaux, tels que, le quartz (*SiO2*), le *PZT* (*PbZiO3*), le *PVDF* et d'autres matériaux. Ces types de matériaux sont essentiellement utilisés pour les micros actionnements. Ils ont une vitesse de réponse élevée suite aux variations de tension. Ils sont précis et permettent des déplacements répétitifs. Un exemple d'actionneur piézoélectrique est présenté sur la figure (II.2). Il a été conçu par le *CEDRAT* pour des applications liées à l'aérospatiale. Il exerce une force de maintien de *50N* pour une course maximale de *3mm*, sa masse est de *350g* **[19]**.

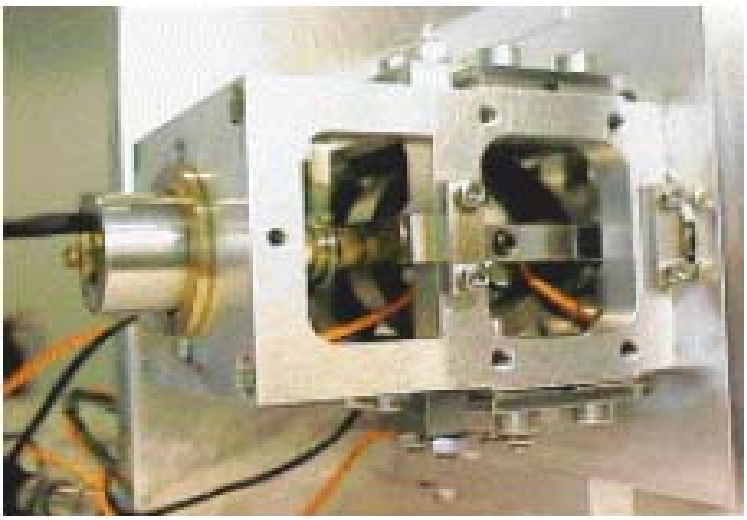


Figure.II.2. Actionneur linéaire piézoélectrique *CEDRAT* **[19]**.

Pour répondre aux exigences industrielles, il faut savoir comment pouvoir réaliser un critère d'actionnement qui puisse donner une course de positionnement micro ou macroscopique bien précise, et avec des dimensions parfaites au système qu'on veut actionner.

II.5.Types d'actionneur piézoélectrique :

Les actionneurs piézoélectriques existant selon leur forme et leurs caractéristiques (temps de réponse, la rigidité et flexibilité,…) sont donnés à la figure. (II.3) **[16]**.

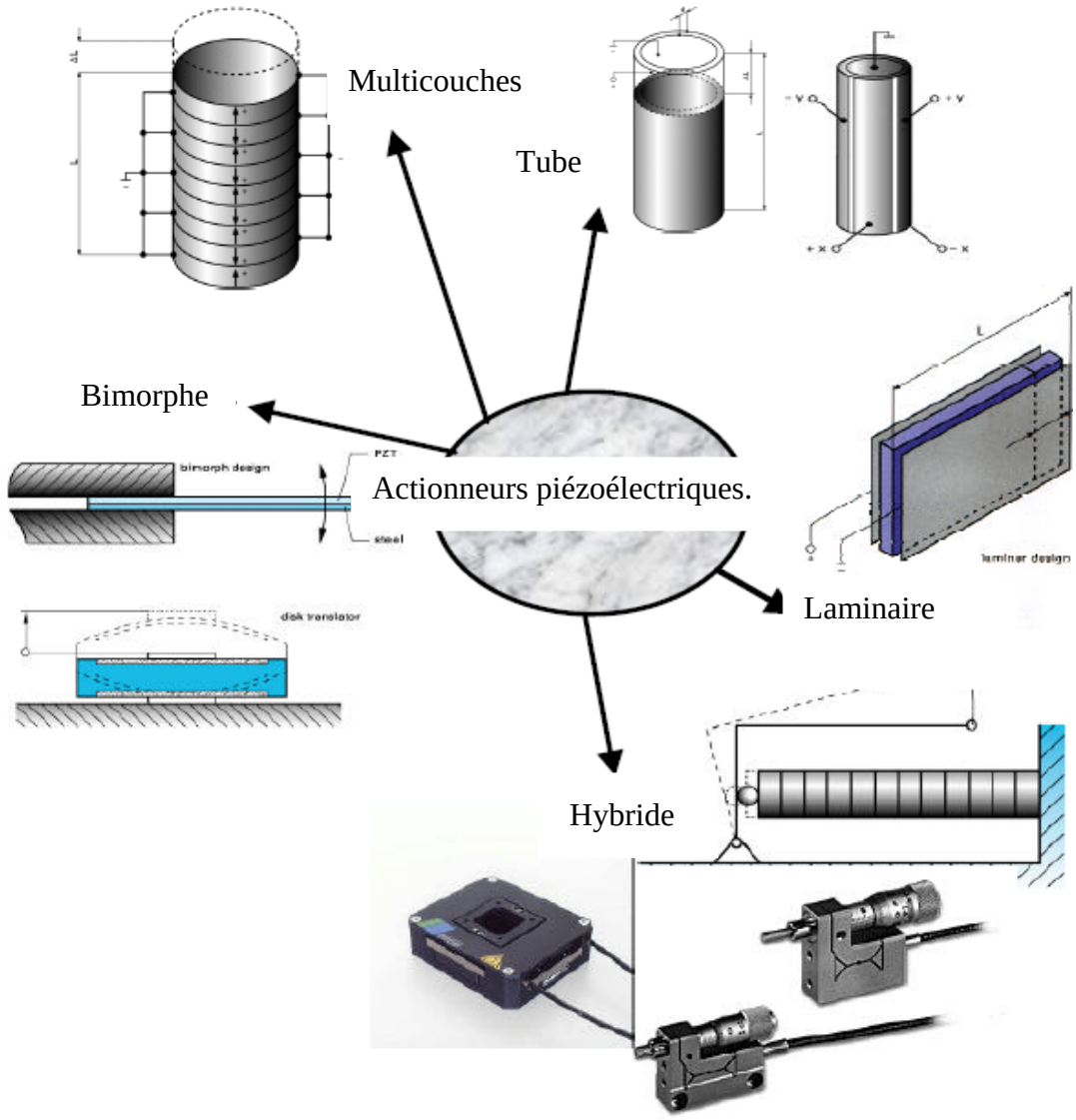


Figure.II.3. Type des actionneurs piézoélectriques existants selon leur forme **[16]**.

II.5.1.Actionneur piézoélectrique multicouches (stack) :

Cet actionneur est composé de couches minces piézoélectriques (disques), chacune des couches est électriquement connectée en parallèle et mécaniquement en série et comprise entre deux surfaces métalliques (les électrodes).

En outre, plus les disques sont minces, plus les champs électriques appliqués et les déformations obtenues pour une tension donnée sont importantes. La valeur des épaisseurs des disques varie en général entre *0.1* et *1mm*. Ceci permet, donc, de réduire le niveau de la tension appliquée pour une même déformation.

Les caractéristiques principales que l'on peut obtenir avec ce type d'actionneur (figure.II.4) sont **[16, 20, 21]** :

1- Capacité à supporter des pressions assez importantes.
2- Bonne rigidité et flexibilité.
3- Intolérance pour les efforts de traction sauf si on applique une précharge.
4- La déformation maximum, pour une longueur totale donnée, est fonction uniquement de l'épaisseur des disques, tandis que le nombre des disques mis en parallèle détermine la rigidité et la stabilité du comportement
5- Réponse rapide
6- Basse sensibilité au bruit et possibilité d'appliquer un contrôle à haute précision, donc bonne fiabilité.

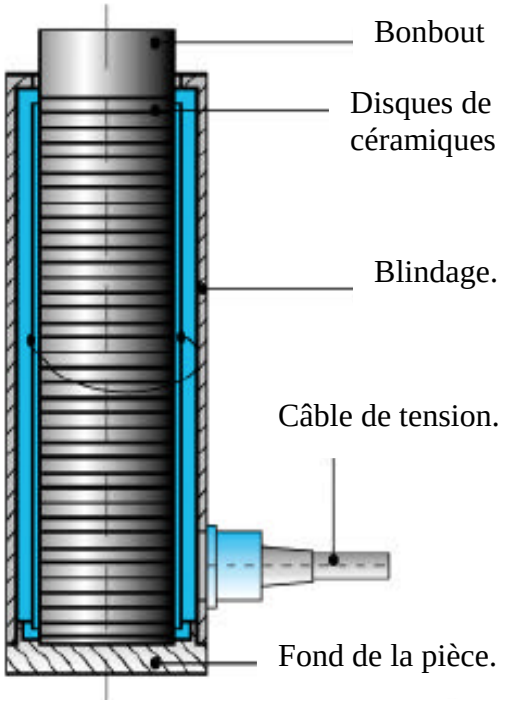


Figure.II.4. Actionneur piézoélectrique de type multicouches (stack) **[21]**.

Pour un actionneur de longueur *l*, la relation entre la tension *Vi* appliqué suivant la direction *i* et la déformation Δl_i parallèle à *j* est donnée par :

$$\frac{\Delta l_j}{V_i} = \frac{\delta_j}{l}\frac{l}{E_i} = d_{ji}$$, sachant que :

$\delta_j = d_{ji}E_i$: est la déformation suivant la direction *j*.
V_i : est la tension appliquée suivant la direction *i*.
Δl_j : est la déformation parallèle à *j*.

II.5.2.Actionneur piézoélectrique laminaire :

Le matériau actif consiste en des couches minces de céramique piézoélectrique dont les extrémités sont connectées entre eux. Dans ce cas d'actionnement, à une augmentation de la tension correspond une contraction orthogonale à la direction de polarisation donc orthogonale à la direction d'action du champ électrique (figure.II.5). Dans ce cas, le coefficient d_{31} vaut environ ½ d_{33}, coefficient qu'on utilise dans le cas d'un actionneur "stack" qui joue le plus grand rôle; par conséquent les effets de l'actionnement direct sont moins importants et on ne l'utilise pas en positionnement. Ils ont, par contre, plus d'applications comme capteurs et comme actionneur des structures flexibles monolithiques **[16]**.

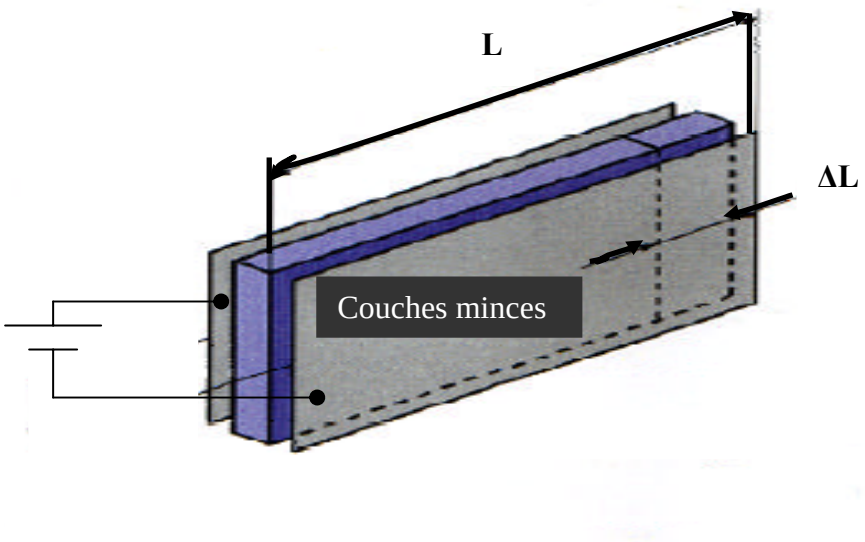


Figure.II.5. Actionneur piézoélectrique de type laminaire **[16]**.

II.5.3.Actionneur piézoélectrique tube :

Ce type d'actionneur est réalisé sous forme d'un tube à parois minces de céramique compressée, auquel on applique une tension entre les parois interne et externe. Au fur et à mesure qu'on augmente cette tension la longueur du tube se réduit, donc c'est encore le coefficient d_{31} qui intervient.

Comme il n'est pas possible de mettre les tubes en parallèle, la surface qui peut reprendre la charge est forte limitée et on ne l'utilise pas pour le positionnement d'objets.

Par contre, ils trouvent application dans les microscopes de type scanner de sonde : le scanner est constitué d'une sonde montée (concentriquement) à une extrémité du tube et le mouvement du scanner est produit par la flexion du tube. Pour ce faire, le tube est polarisé radialement, sa paroi interne est mise à la terre et on applique une tension positive à une des quatre électrodes externes, tandis que les autres électrodes sont à la terre **[16]**.

Cette tension fait varier la longueur du quadrant correspondant et produit ainsi une déflection horizontale à l'extrémité du tube (figure.II.6).

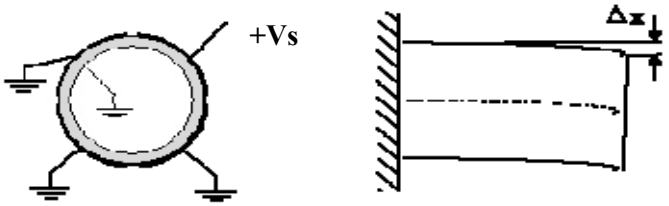


Figure.II.6. Actionneur piézoélectrique de type tube **[16]**.

II.5.4.Actionneur piézoélectrique hybride :

On a les systèmes basculants (*Tiliting* system), figure (.II.7.a), qui peuvent atteindre des déplacements jusqu'à un *mm* et sont constitués par un actionneur type stack et d'un système mécanique d'amplification de l'expansion. Il y a le revêtement qui joue le rôle d'un bras de levier dont la charnière est représentée par une zone plus souple qui peut effectuer une flexion et qui pourtant élimine les inconvénients mécaniques tels que: jeux, frottement, saccade.

La variation de la longueur du piézoélectrique est amplifiée par ce mécanisme à bras de levier. La surface mobile tourne d'un angle d'amplitude jusqu'à *0.7°* et le point du support à un déplacement de *0.7mm* ; par couplage avec une table de positionnement, on peut réaliser un positionnement linéaire parallèle de l'ordre de plusieurs dixièmes de *mm* pour une longueur du matériau actif de quelques *cm*.

L'ensemble est conçu pour limiter à *1,5%* le déplacement orthogonal à la direction de translation et peut être utilisé pour des positionnements linéaires où comme élément d'échange **[16]**.

L'avantage de ce type d'actionneur est de pouvoir assembler plusieurs blocs pour avoir un positionnement à haute précision sur plusieurs axes. Il suffit simplement de visser, on n'aura même pas besoin de mécanisme de guidage **[23]**.

Un autre exemple d'hybride peut être le couplage entre un étage amplificateur comportant une structure de parallélogramme et un actionneur piézoélectrique qui le pousse (*PZS-200* produit par *Burleigh*), figure (.II.7.b). Le parallélogramme amplifie la course de l'actionneur en donnant un mouvement bien linéaire et des déplacements couplés du principal suivant les directions orthogonales à la direction d'actionnement.

Par ajout d'une précharge on obtient de bonnes rigidités et repetabilités, ainsi que des courses d'actionnement de l'ordre de quelques centaines de *mm* avec une tension appliquée de *150V*.

Caractéristiques du (*PZS-200*) **[16]** :

1– Course (*100V*) : *300μm* **2–** % Non linéarité: 6% **3-** %Hystérésis : *20%*
4– Charge max : *2.5Kg* **5-** capacité : *3.1μF* **6–** Rigidité : *0.13 N/μm*
7– fréquence de résonance sans charge : 400 Hz
8– fréquence de résonance avec une charge de *50g* et de $f = 210\ Hz$
9– déplacements couplés : *<10* arcs secs.

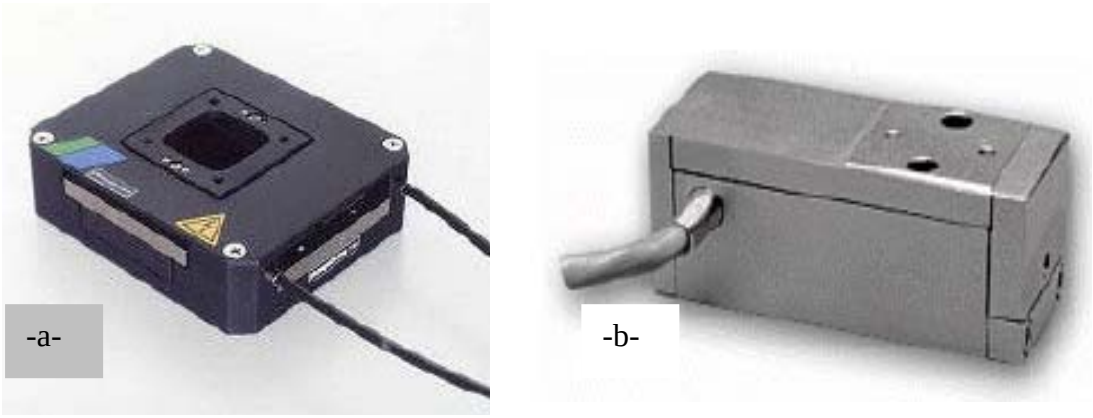


Figure.II.7. Actionneur piézoélectrique de type hybride (a) : *Tiliting* system
(b) : *PZS-200-Burleghigh* **[16]**.

II.5.5. Actionneur piézoélectrique Bimorphe :

Dans un actionneur de type bimorphe, la course d'actionnement est produite par la flexion de l'actionneur. Ceci peut être réalisé au moyen d'un ressort métallique et un disque de céramique. Lorsque la céramique varie en longueur le support en métal garde ses dimensions et le système compense le déséquilibre dû à l'expansion différentielle en se courbant ou en se fléchissant. On peut obtenir le même effet si on connecte *2* couches de *PZT*, plus une couche intermédiaire, et on fait en sorte que l'une réduise ses dimensions lors de l'expansion de l'autre.

En pratique, le système est composé de *9* couches (figure.II.8) :

– Quatre électrodes.
– deux piézoélectriques
– deux couches adhésives
– une couche centrale laminée qui donne plus de raideur et plus de résistance au système, mais au détriment de la déformation ; souvent l'acier inoxydable est utilisé pour les applications où on a des forces très élevées. Le cuivre est utilisé lorsqu'on souhaite plutôt éviter les couplages magnétiques et réduire le coût.

Si on appliquait une seule tension au système, on aurait les deux couches piézoélectriques qui travaillent en série ; en appliquant une tension sur chaque couche piézo-électrique on les met en parallèle, on peut atteindre la même déformation que dans un cas d'alimentation série en alimentant avec la moitié de la tension.

De cette manière, on peut avoir des déplacements assez importants, mais en même temps on perd en rigidité, donc cette solution est à déconseiller dans plusieurs d'applications.

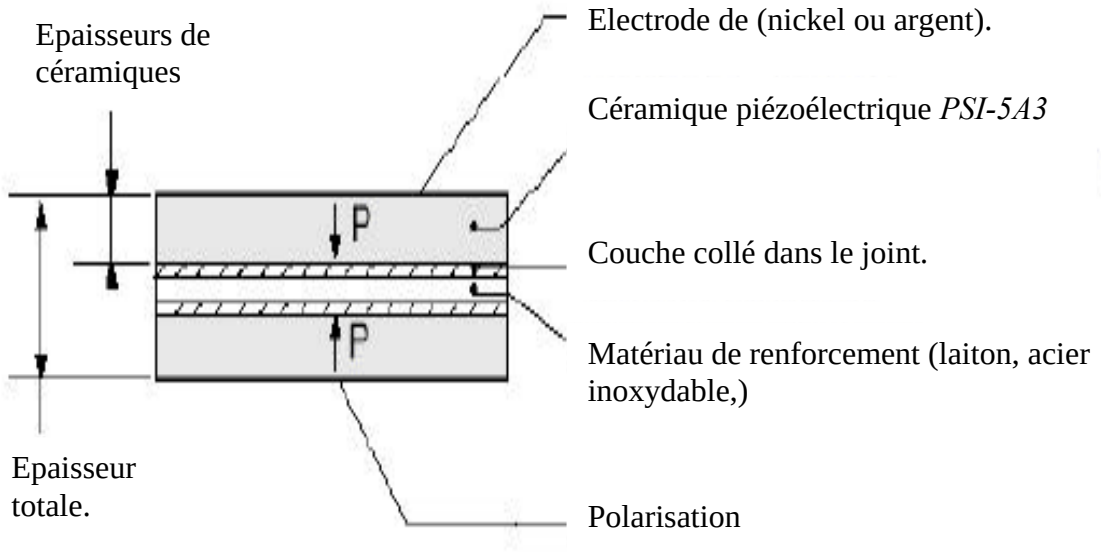


Figure.II.8. Actionneur piézoélectrique de type bimorphe **[16]**.

II.6. Structures courantes du mouvement:

La transmission de mouvement repose généralement sur deux types de déplacements vibratoires élémentaires.

II.6.1. Mouvement cyclique à hystérésis nulle :

Un point appartenant à la partie vibrante se déplace jusqu'à entrer en contact avec l'élément mobile, et provoquer son déplacement. La trajectoire empruntée par le point de surface est similaire à celle de la phase de rétraction entre ses deux positions extrêmes dans l'espace (figure.II.9) **[25]**.

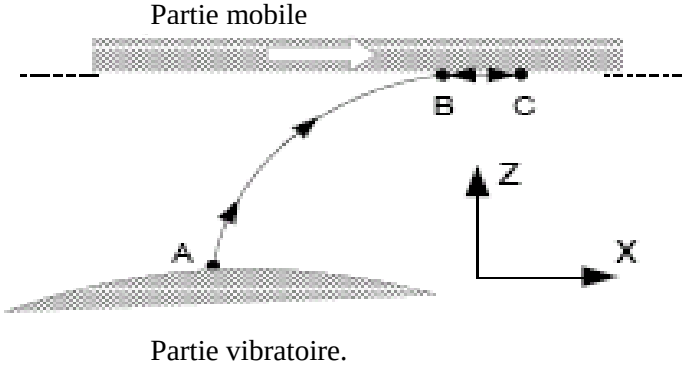


Figure.II.9. Mouvement à hystérésis nulle. **[25]**.

Pour cette raison, une dissymétrie des conditions de contact sera nécessaire pour que l'effort transmis lors de la phase extensive ne soit pas annulé lors de la phase rétractive, ce qui aurait pour effet un déplacement moyen nul.

Cette dissymétrie peut être obtenue par les propriétés géométriques de la surface en mouvement, ou encore par une différence de vitesse entre la phase d'extension et de rétraction, jouant sur l'effet inertiel.

II.6.2.Mouvement cyclique à hystérésis non nulle :

Ici la trajectoire empruntée par un point de surface n'est pas identique lors de la rétraction et de l'extension, produisant ainsi un débrayage physique des deux éléments (figure. II.10). La participation de l'effort de friction est nécessairement dissymétrique.

L'allure de l'hystérésis peut être variable selon que l'on favorise le contact ou le débrayage, donnant lieu à de nombreuses combinaisons de mouvements. Généralement, les structures mécaniques travaillent en quasi-résonance, principalement pour maximiser l'amplitude des déplacements. Le moteur Shinseï (*mh*) par exemple fonctionne sur la génération de deux ondes stationnaires en quadrature, si bien que la superposition de deux mouvements sinusoïdaux amène à une trajectoire elliptique.

Le mouvement cyclique elliptique s'obtient toujours soit par la combinaison de modes couplés de différentes céramiques, soit par la combinaison de deux ondes stationnaires, ou encore par la propagation d'une onde acoustique (progressive).

Ces principes de transmission mécaniques sont les fondements des actionneurs multi degrés de libert. Ces actionneurs ne se distinguent pas par le nombre ou le type de degrés de liberté que confèrent chacun d'entre eux, mais plus particulièrement par leur géométrie et le principe vibratoire à la source du déplacement.

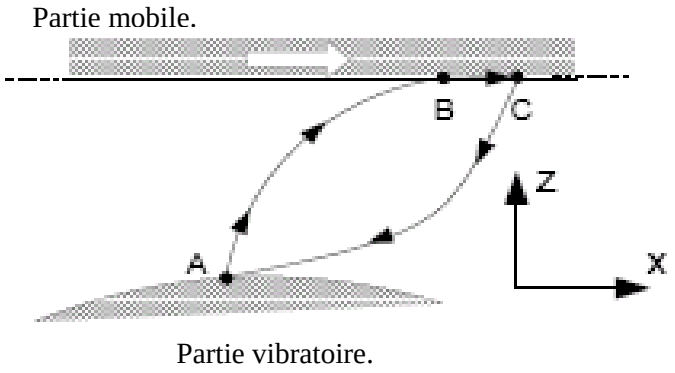


Figure.II.10. Mouvement à hystérésis non nulle. **[25]**.

II.7. les capteurs:

Le capteur est le dispositif qui, soumit à l'action d'un mesurande non électrique présente une caractéristique de nature électrique telle que la charge, la tension, le courant ou l'impédance.

II.7.1. Capteur piézoélectrique:

Le capteur piézoélectrique consiste en l'apparition d'une polarisation électrique ou la variation d'une polarisation déjà existante dans certains diélectriques anisotropes naturels (quartz), ou artificiels (céramiques traitées…), lorsqu'ils sont déformés sous l'effet d'une force de direction convenable.

Si l'on réalise un condensateur en déposant une paire d'armatures sur les faces opposées d'une lame piézoélectrique, ils s'opposent sous l'influence d'une force des charges de signes contraires sur les armatures opposées et donc une différence de potentiel, proportionnelle à la force appliquée.

Un tel dispositif permet la mesure des forces et de toute grandeur physique telles que la pression, l'accélération et la vibration. Le capteur est basé donc en générale sur le principe de l'effet piézoélectrique direct.

II.8. Modèles mécanique et électrique des actionneurs piézo-électriques :

Il existe plusieurs types de modèles d'actionneurs piézoélectriques. Ces modèles sont bien adaptés à l'étude de ces actionneurs car ils travaillent au voisinage de leurs fréquences propres.

Mason dans son livre propose une approche formelle de la modélisation. *Rossi* en adapte les principes, entre autres, aux transducteurs piézo-électriques, et *Nakamura* et *al*, introduisent pour la première fois le concept de redresseur mécanique pour simuler l'effet du 'stick and slip' dans un moteur ultrasonore hybride.

Il faut pouvoir envisager le comportement d'un actionneur ou d'un capteur piézo-électrique dans les différentes conditions de fonctionnement. On souhaite donc en avoir un modèle adapté à l'étude de son comportement, aussi bien du point de vue électrique que du point de vue mécanique **[21]**.

II.8.1. Modèle mécanique :

L'actionneur piézoélectrique réel est décomposé en un piézoélectrique idéal, dont la déformation ξ_p, suit exactement la tension U_{exc} appliquée à ses bornes. Le déplacement est transmis à une masse *meq* par un élément flexible (compliance) C_p. Un élément amortisseur R_p modélise les pertes mécaniques dans la céramique et dans les éléments de liaisons. Finalement une force F_l, appliquée à m_{eq}, représente la charge.

L'élément piézoélectrique doit déplacer sa propre masse ainsi que celle du substrat. On définit une masse équivalente m_{eq} à l'ensemble substrat et piézocéramique.

En faisant l'hypothèse que les dimensions géométriques des composants sont petites vis-à-vis des longueurs d'ondes sonores dans les matériaux, il est facile de démontrer que la masse équivalente vaut, pour les trois types de déformations **[18]** :

$$m_{eq} = (1/3).m_{pizo} + m_l \qquad \text{(II.1).}$$

Où :

m_{pizo} et m_l sont respectivement la masse de la céramique piézoélectrique et d'une masse supplémentaire qui y est fixée rigidement.

La détermination de R_p est délicate. Nous pouvons tout de même en fixer un ordre de grandeur en considérant les pertes mécaniques dans la céramique. Elles peuvent être déduites du facteur de qualité Q. En effet si l'amortissement est faible, il est lié au facteur d'amortissement relatif η par la relation:

$$\eta = \frac{1}{2 \cdot Q} \quad \text{et} \quad \eta = \frac{R_p}{2 \cdot m_{eq} \cdot w_0}$$

Où w_0 est la pulsation propre du système oscillant qui vaut: $w_0 = \sqrt{\frac{C_p}{m_{eq}}}$

D'où finalement:

$$R_p = \frac{\sqrt{m_{eq} \cdot C_p}}{Q} \qquad \text{(II.2).}$$

Cette valeur est indicative et devra être déterminée expérimentalement cas par cas. Le système mécanique ainsi formé est représenté sur la figure (II.11) suivante :

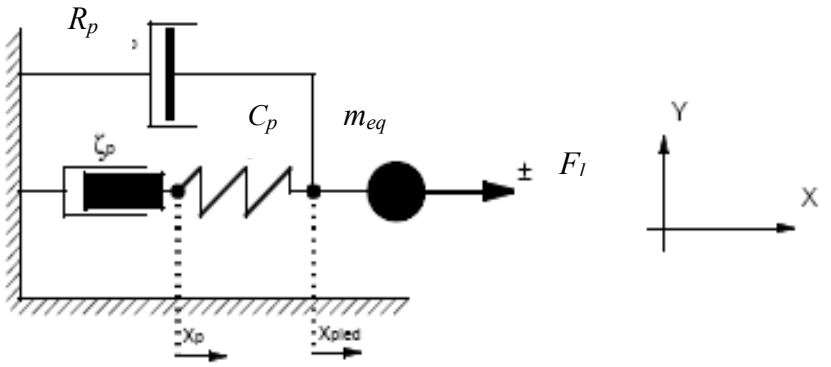


Figure.II.11. Modèle mécanique équivalent d'un actionneur piézoélectrique **[18]**.

Le modèle précédent de la figure (II.11) est simulaire à un modèle mécanique (masse/ressort/amortisseur) qui est présenté sur la figure (II.12).

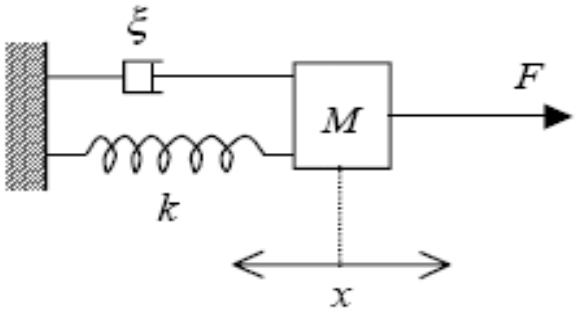


Figure.II.12. Modèle mécanique équivalent au modèle de la figure (II.11) **[26]**.

Soit le système mécanique masse ressort amortisseur de la figure (II.12). Par application du principe fondamental de la dynamique, l'équation différentielle décrivant le comportement de la masse *M* soumise à une force *F* est donnée par :

$$M\frac{d^2x}{d^2t}+\xi\frac{dx}{dt}+kx=F \qquad \text{(II.3).}$$

II.8.2. Modèle électrique :

Le modèle électrique d'un actionneur piézoélectrique est semblable au modèle mécanique précédent (masse, ressort, amortisseur), qui par analogie électromécanique (inductance, capacité, résistance) respectivement sur la figure II.13.

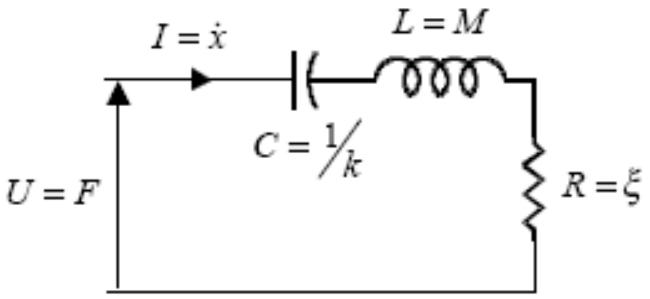


Figure.II.13. Modèle électrique équivalent d'un actionneur piézoélectrique. **[26]**.

Soit le circuit électrique *RLC* de la figure (II.13). En écrivant les lois de *Kirchhoff* (nœuds et mailles), on obtient alors l'équation différentielle suivante :

$$L\frac{d^2q}{d^2t}+R\frac{dq}{dt}+\frac{1}{C}q=U \qquad \text{(II.4).}$$

Le tableau (II.2) représente une analogie directe entre grandeurs mécaniques et électriques :

Grandeurs mécaniques	Grandeurs électriques.
Déplacement *x (m).*	Charge électrique *q (C.).*
Vitesse *v (m/s).*	Courant *I (A).*
Force *F (N).*	Tension *U (V).*
Masse *M (kg).*	Inductance *L (H).*
Souplesse *1/k (m/N).*	Capacité *C (F).*
Amortissement *ξ (kg/s).*	Résistance *R (Ω).*

Tableau .II.2. Analogie électromécanique **[26]**.

II.8.3.Modéle dynamique :

Dans le modèle dynamique, le piézoélectrique est envisagé principalement comme une charge capacitive, car il consomme de l'énergie uniquement pendant l'expansion tandis qu'il peut conserver sa déformation durant des heures sans consommer. En même temps, il nous faut une puissance élevée pour engendrer des variations d'état rapides, donc typiquement en fonctionnement dynamique. Il faut remarquer que la capacité dont on parle est une grandeur non- linéaire vis-à-vis de la tension appliquée.

Pendant les mouvements lents jusqu'à quelques *Hertz*, on voit le piézoélectrique comme une capacité *Co*. Pour un fonctionnement aux fréquences élevées il faut rajouter en parallèle un circuit résonant série pour pouvoir en représenter convenablement le fonctionnement dynamique : il représente l'effet de l'inertie et de la rigidité de la masse mise en mouvement sur le comportement dynamique de l'ensemble.

Lorsqu'on a une variation de la longueur du piézoélectrique, on en varie la charge électrique, donc on obtient un courant $I= dQ/dt = CdV/dt$ dépendant de la rapidité des variations.

Le circuit électrique équivalent peut être représenté comme suit, figure.II.14. **[16,27]**.

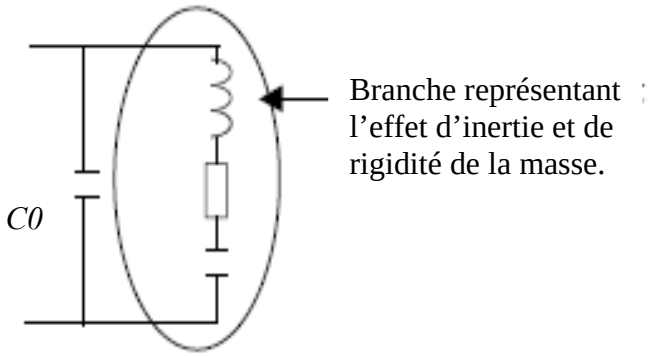


Figure.II.14. Circuit électrique équivalent d'un matériau piézoélectrique **[16]**.

II.9. Conclusion :

Dans le premier groupe de méthodes d'actionnement, l'utilisation de l'interaction magnétique est préférable. Dans le cas de besoin de forces agissant à distance (sans contact), basé sur le contact et le couplage électrique, l'actionneur piézoélectrique est préférable. Ils sont utilisés pour toute application nécessitant un temps de réponse rapide où la consommation de puissance est à limiter. Les avantages principaux liés à cette dernière technologie sont :

1- Les temps de réponse extrêmement limités, ce qui permet d'avoir presque toujours un comportement linéaire de l'actionneur,

2- La force développée par l'effet piézo-électrique est maximale au début de la déformation, ce qui donne une condition idéale pour l'actionnement, les forces à vaincre étant plus élevées pendant la phase initiale

5- la résistance à des pressions élevées,

6- La relation linéaire entre déformation et tension appliquée

7- L'efficience énergétique suite à l'absence de dissipations importantes de chaleur

Les caractéristiques de fonctionnement et les avantages que peut procurer l'utilisation des actionneurs piézoélectriques en microsystèmes peuvent être observés dans le choix de type d'actionneur (multicouches, laminaire, tube, hybride, bimorphe) qui ont des spécifications relatives à la résolution qui dépend de l'instrument utilisée par le système de contrôle.

Chapitre III

Modélisation des transducteurs piézoélectriques

III.1.Introduction:

Différentes études ont été menées ces dernières années pour améliorer et développer les transducteurs piézoélectriques, à cause de leurs importances dans l'industrie, surtout dans le domaine de la robotique et l'aéronautique…, **[28, 29]**. Dans certaines applications spécifiques, les systèmes intégrant des actionneurs piézoélectriques sont soumis à de fortes sollicitations externes **[30, 31, 32]**. Aussi il est important de connaître le comportement de ces actionneurs sous différentes conditions d'excitation : mesures sous contrainte uniaxiale et durant un cycle d'hystérésis afin de déterminer leurs limites de fonctionnement. Ainsi le comportement de ces actionneurs a été étudié par des approches analytiques de matériaux tirées de résultats expérimentaux.

Afin de démontrer leur comportement, dans le cas linéaire **[33, 34, 35]**, et non linéaire **[36]**, on propose deux modèles de simulation qui simule le cycle d'hystérésis (linéaire et non linéaire). On identifie les paramètres des deux modèles par extraction à partir de cycles d'hystérésis expérimental de quelques films piézoélectriques.

Ces deux modèles sont basés l'un sur un modèle mécanique (modèle linéaire) dont le système mécanique est composé d'une masse, un ressort et un amortisseur), et l'autre modèle se base sur la théorie d'énergie libre de *Landau Devonshire* (modèle non linéaire).

III.2.Modéle mécanique d'un actionneur piézoélectrique:

Nous nous intéressons au devellopement d'un mécanisme de position (*MP*) pour atteindre un modèle mécanique (masse, ressort, amortisseur) ou un modèle électrique analogue (inductance, capacité, résistance) respectivement qui en principe l'un ou l'autre se sont un système du deuxième ordre de temps linéaire invariant.

III.2.1.Développement du modèle:

Nous supposons que c'est pratiquement réalisable en utilisant un système mécanique avec des ressorts à lame et une certaine forme d'amortissement électrique. Le système mécanique étant composé d'un mécanisme de position (*MP*) et deux systèmes de masse, ressort et amortisseur situés de part et d'autre du mécanisme de position. En raison de la symétrie, les *PEAs* sont placés de part et d'autre part du (*MP*).

En fait ainsi, les *PEAs* peuvent être considérés également fixés au (*MP*) pour éviter le problème de la séparation de la piezo-masse. Pour se déplacer, par exemple, dans la direction positive, on agit sur les tensions appliquées à *PEA1* et *PEA2* en faisant varier $u+$ *et* $u-$ respectivement. La figure (III.1) montre le modèle mécanique avec l'hypothèse concernant la modélisation des *PEAs*.

Les deux hypothèses suivantes sont considérées :

1- Mécaniquement, un *PEA* est un système de masse, ressort, amortisseur.

2- Un *PEA* est un actionneur pour les systèmes mécaniques et peut donc être considéré comme générateur de force **[37]**.

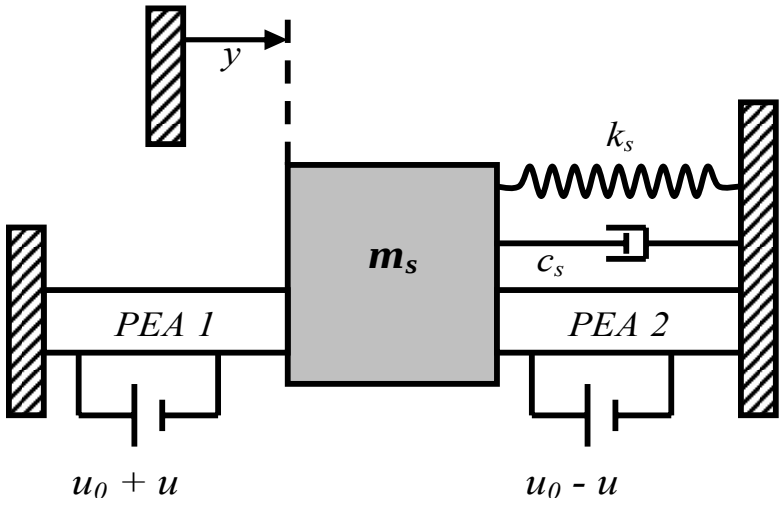


Figure III. 1: Mécanisme de position (masse, ressort, amortisseur) conduit par les actionneurs piézoélectriques **[37]**.

où
y: le déplacement simulé,
$(u_0 + u)$ et $(u_0 - u)$: les tensions appliquées,
m_s, k_s, et c_s, les propriétés de la masse, ressort, et l'amortisseur, du *MP*, respectivement.

En d'autres termes, une force d'actionnement est produite en raison de la tension appliquée. Ces hypothèses sont utilisées pour atteindre le modèle de la figure (III.2),

où : m_p, k_p, et c_p, sont les propriétés mécaniques qui sont identiques des deux *PEAs*.
Ici m_p, est la masse efficace du *PEA*, où pour une masse répartie d'une manière homogène peut être calculée facilement pour être la moitié de la masse du *PEA*.
F_0+F_1 *et* F_0-F_2 : sont des forces d'actionnement dues aux tensions appliquées $u_0+ u$ et $u_0 - u$ respectivement **[37]**.

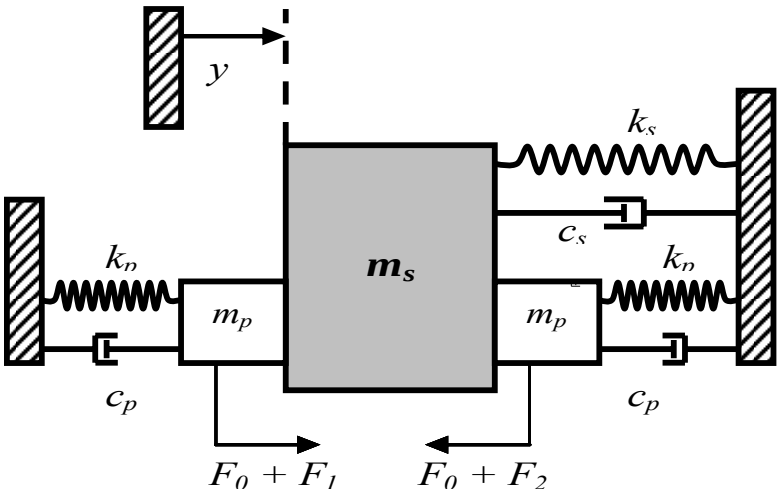


Figure III .2 Le modèle mécanique de (*MP*) et des *PEAs* **[37]**.

III.2.2 Modèle mécanique équivalent d'un actionneur piézoélectrique:

Il est claire que ce modèle est identique à un système très simple et bien connu (masse, ressort, amortisseur) présenté dans la figure (III.3).

Où :

m, k, c, sont les propriétés générales de la masse, ressort, et l'amortisseur respectivement, sachant que: $m = 2m_p + m_s$, $k = 2k_p + k_s$, et $c = 2c_p + c_s$ et $F = F_1 + F_2$ est la force totale d'actionnement **[37]**.

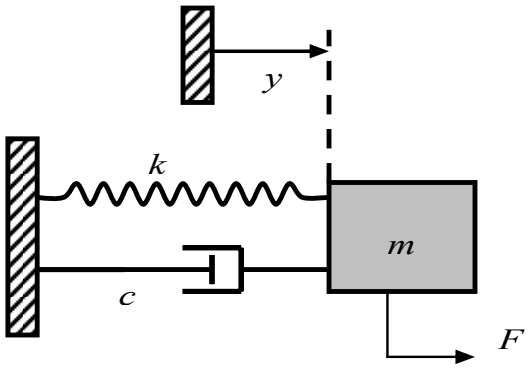


Figure.III.3 Le modèle mécanique simplifié, équivalent au modèle de la figure (III.2).

III.2.2.1 Modèle analytique d'un actionneur piézoélectrique:

Dans ce chapitre, nous développons l'équation différentielle de ce système. Le principe fondamental de la dynamique nous permet d'écrire l'équation du mouvement (III.1). C'est une équation différentielle du deuxième ordre.

III.2.2.2.L'équation du mouvement :

D'après le principe fondamental de la dynamique, et après quelques simplifications, nous obtenons l'équation du mouvement, qui gère le système de la figure III.3. Elle est donnée par la relation:

$$\ddot{y} + \frac{c}{m}\dot{y} + \frac{k}{m}y = \frac{1}{m}F \qquad \text{(III.1).}$$

où:

c: constante d'amortissement totale du modèle.
k: constante de rigidité totale du modèle.
m: la masse totale du modèle.

La fonction de transfert correspondante est:

$$Y(S) = \frac{1/m}{S^2 + (c/m)S + (k/m)} F(S) \qquad \text{(III.2).}$$

A partir de l'équation (III.2) on établit la relation entre la force appliquée *F* et le déplacement *Y*, sachant que *F* en réalité est la tension appliquée pour déplacer l'actionneur piézoélectrique. La tension est généralement sinusoïdale.

III.2.2.3. La conception des propriétés mécaniques:

La forme générale de l'équation du mouvement d'un système du deuxième ordre est donnée par l'équation:

$$\ddot{y} + 4\Pi\xi f_0 \dot{y} + 4\Pi^2 f_0^2 y = \frac{1}{m} F \qquad \text{(III.3).}$$

Où:

f_0: la fréquence propre non amortie et ζ est l'amortissement relatif.

Par comparaison (III.1) et (III.3) on a:

$$k/m = 4\Pi^2 f_0^2 \qquad \text{(III.4).}$$
$$c/m = 4\Pi \zeta f_0 \qquad \text{(III.5).}$$

Les propriétés des *PEAs* sont fixées, parce que les variables de conception sont des contraintes de la forme suivante: $m > 2m_p$, $k > 2k_p$, $c > 2c_p$. **[37]**.

III.2.2.4. La fréquence propre non amortie:

Le système de commande numérique, utilisant les processeurs optimaux dont la durée de calcul est de*100 μs*, développé dans la référence **[37]** a été utilisé comme base de travail. En d'autres termes la durée d'échantillonnage est prise égale à *100 μs* et la fréquence d'échantillonnage est *10 kHz*.

D'après le théorème d'échantillonnage du *Shannon*, on sait qu'il est raisonnable que la fréquence propre non amortie soit *10* fois plus petite que la fréquence d'échantillonnage.

Pour appliquer cette condition pratique nous concéderons que la fréquence propre non amortie est égale à ($f_0 = 1kHz$) **[37]**.

On applique f_0 dans (III.4) nous obtenons :

$$k/m = 3.95 * 10^7\ Hz^2 \qquad \text{(III.6).}$$

III.2.2.5. Amortissement relatif:

Il est connu que l'amortissement relatif $\xi = 1/\sqrt{2}$, est le meilleur échange entre le dépassement et le temps de stabilité dans le cas de la réponse indicielle.

On introduit ainsi f_0 et ζ dans (III.5), nous obtenons :

$$c/m = 8.89*10^3 \ Hz \qquad \text{(III.7).}$$

A partir du catalogue de *Instrument Physik*, nous choisissons le type *P-244.40*, qui a une rigidité : $k_p = 3.30*10^7$ *N/m*. **[37]**.

Ainsi le calcul de la rigidité du (*MP*) peut être calculé pour une limite supérieure $k_s \leq 1.32 *10^7$ *N/m*. Le choix de la valeur $k_s = 1.0*10^7$ *N/m*, nous permet de calculer les propriétés globales de la masse, ressort et de l'amortisseur.

D'après le modèle simplifié de la figure (III.3), et les paramètres globaux du système (masse, ressort, amortisseur) on a:

$$k = 2k_p + k_s.$$

On remplace les valeurs du k_p et k_s, on trouve : $k = (2* 3.30 + 1.0)* 10^7 = 7.6*10^7$.

On remplace la valeur de *k*, dans les équations (III.6) et (III.7), on trouve les valeurs des paramètres *m, c, k*:

m=1.92 (kg).
*c= 1.71*10^4 (kg/s).*
*k=7.6*10^7 (N/m).*

III.2.3.Simulation:

III.2.3.1.Modèle d'espace d'état:

D'après l'équation (III.1) qui régit le système du modèle mécanique de l'actionneur, on peut introduire son modèle d'espace d'état sous forme suivante:

$$\dot{x}(t) = A \cdot x(t) + B \cdot u(t)$$

$$y(t) = C^T \cdot x(t) + D \cdot u(t) \qquad \text{(III.8).}$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{k}{m} & \frac{-c}{m} \end{bmatrix}$$

$$B \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{m} \end{bmatrix} \qquad C^T = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix}, \qquad D = \begin{bmatrix} 0 \end{bmatrix}.$$

III.2.3.2Application:

On remplace les valeurs des paramètres (m, k, c) dans (III.8), on aura:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -3.95e7 & -8.89e3 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.52 \end{bmatrix}$$

$$C^T = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} 0 \end{bmatrix}$$

On applique une force F sur le système mécanique (*MP*) pour obtenir le déplacement *y (t)* sous forme d'un cycle d'hystérésis, qui est -par analogie électromécanique- une tension sinusoïdale *u (t)*.

Pour valider nos résultats, on compare les résultats de simulation aux résultats expérimentaux obtenus par la manipulation de la figure III.4 **[38]**. Celle ci teste le déplacement en fonction de la tension appliquée d'un actionneur piézoélectrique de référence (*APA120ML*) **[38, 39]**. Le diagramme est composé d'un (*PC* + une carte d'interface *DSP*), qui est utilisée pour enregistrer les données et produire les signaux désirés.

Dans cette expérience la carte *DSP* a été utilisée pour créer une onde de *1kHz*, pour un signal sinusoïdal d'amplitude *180V*, qui est amplifiée par un amplificateur. Ce signal a été appliqué à la couche *PZT* de l'actionneur. Le *DSP* enregistre le déplacement mesuré à l'aide d'un vibromètre laser (*Polytec OFV3001*).

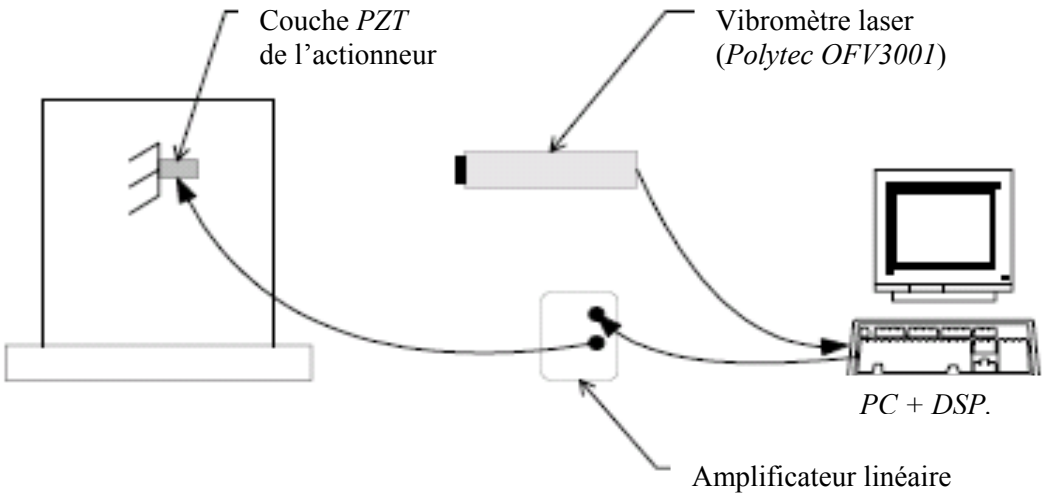


Figure.III.4. Test expérimental de déplacement d'un actionneur piézoélectrique référence (*APA120ML*). **[38]**.

Le déplacement en fonction de la tension appliquée sur la couche *PZT* est enregistré par *DSP* a été visualisé par *PC*, figure (III.5) **[38]**.

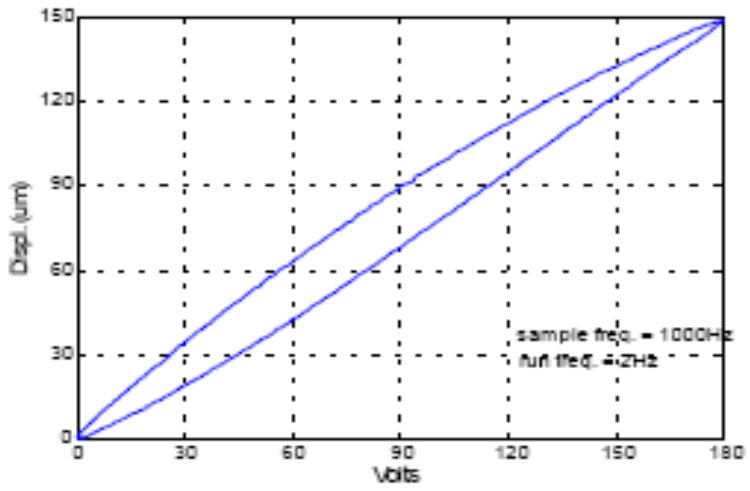


Figure.III.5. Déplacement mesuré par le vibromètre en fonction de la tension appliquée à la couche *PZT* d'un actionneur (*APA120ML*). **[38]**.

On applique une tension sinusoïdale, d'amplitude *180V* et de fréquence *1000Hz*, à l'entrée du système mécanique modélisé précédemment (masse, ressort, amortisseur), et on simule le modèle d'espace d'état (III.8) sous environnement *Matlab simulink 7,* avec *m=1.92 (kg), c= 1.71*10^{4} (kg/s)*, *k=7.6*10^{7}(N/m)*. La figure (III.6) montre le déplacement simulé en fonction de la tension appliquée.

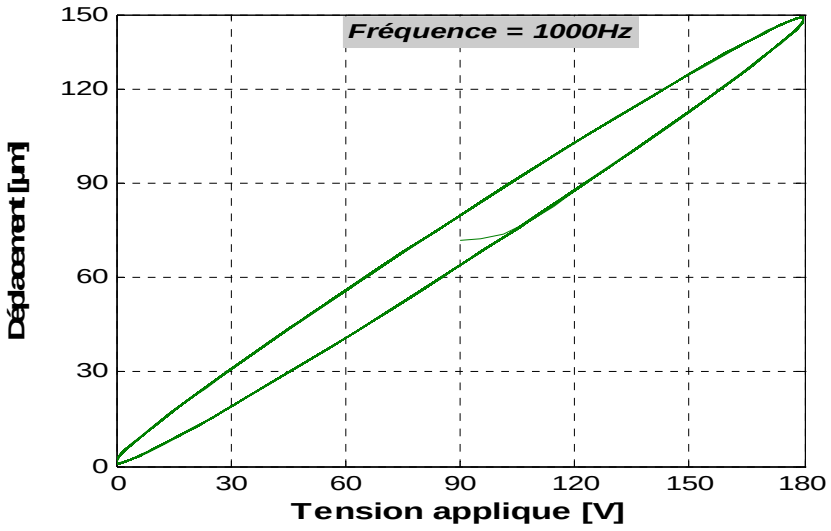


Figure III.6. Le déplacement *y* simulé en fonction de la tension applique *u*.

Les figures (III.5) et (III.6), montrent (une similitude) une approche remarquable entre les deux formes de cycle d'hystérésis qui décrit le comportement d'un actionneur piézoélectrique linéaire. Ceci justifie la validité du modèle mécanique (masse, ressort, amortisseur) qui peut jouer le même rôle qu'un actionneur piézoélectrique (exemple de l'actionneur (*APA120ML*)).

La différence entre les deux systèmes réside certainement dans les quelques caractéristiques intrinsèques de l'actionneur piézoélectrique tels que temps de réponse, durée de vie,…etc.

III.2.3.3.Minimisation des pertes d'hystérésis :

Les matériaux piézoélectriques sont caractérisés par leur cycle d'hystérésis. La surface de ces cycles représente les pertes par hystérésis du matériau. Analysons le cycle en fonction de ces paramètres pour réduire les pertes par hystérésis et linéariser la caractéristique.

III.2.3.3.1. L'effet de la fréquence de l'entrée :

Nous remarquons que la surface du cycle d'hystérésis de la figure (III.6) est importante qui est en fait l'énergie dissipée (les pertes par hystérésis) pendant le déplacement. Ceci est l'un des inconvénients qui limite la précision des micros et des macros déplacements. Ces pertes peuvent être réduites en variant la fréquence d'entrée *f.*

Pour réduire les pertes par hystérésis et améliorer les performances de l'actionneur, nous diminuions la fréquence *f*. On remarque que lorsqu'on augmente la fréquence *f*, les pertes augmentent et réciproquement lorsqu'on diminue *f,* les pertes diminuent. Les pertes par hystérésis sont directement proportionnelles à la fréquence conformément à leur loi.

Les figures (III.7) et (III.8), (III.9), représentent le déplacement en fonction de la tension, pour les fréquences (*f = 500Hz*, *f = 100Hz et f = 10Hz*). La différence des pertes est nette en comparaison avec la figure (III.6) enregistrée pour une fréquence de *1000 Hz*. Pour une fréquence de *10 Hz*, les pertes sont pratiquement nulles, ce qui permet une bonne précision entre le déplacement et la tension appliquée pour une course de l'actionneur de l'ordre de (*mm* à *cm*). Les pertes par hystérésis (dissipation de l'énergie) diminuent en basse fréquence. Les pertes par hystérésis sont proportionnelles à la fréquence de la tension appliquée.

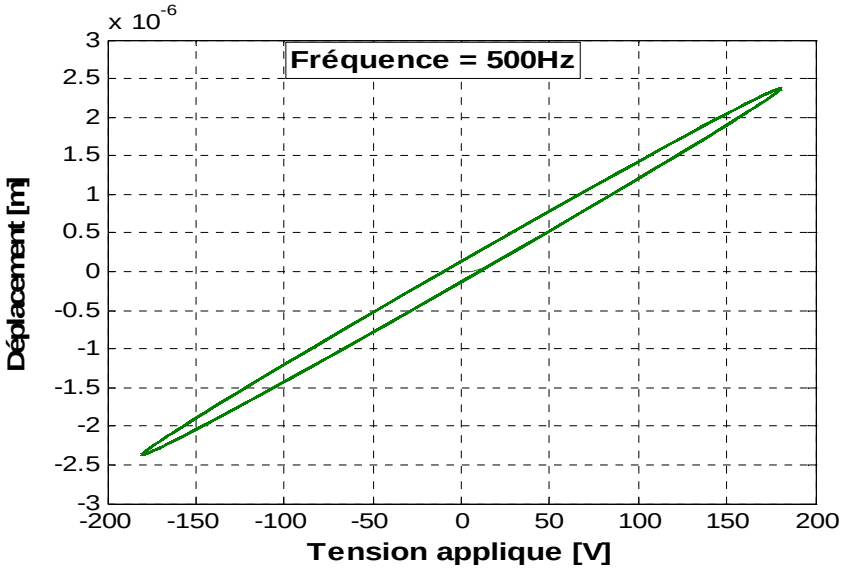


Figure.III.7. Déplacement *y* en fonction de la tension *u* pour *f=500Hz*.

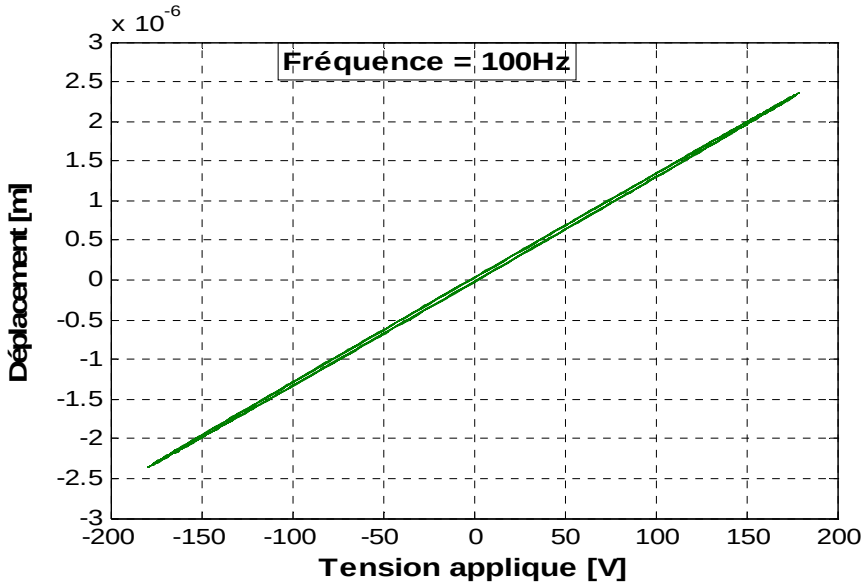


Figure.III.8. Déplacement *y* en fonction de la tension *u* pour *f=100Hz*.

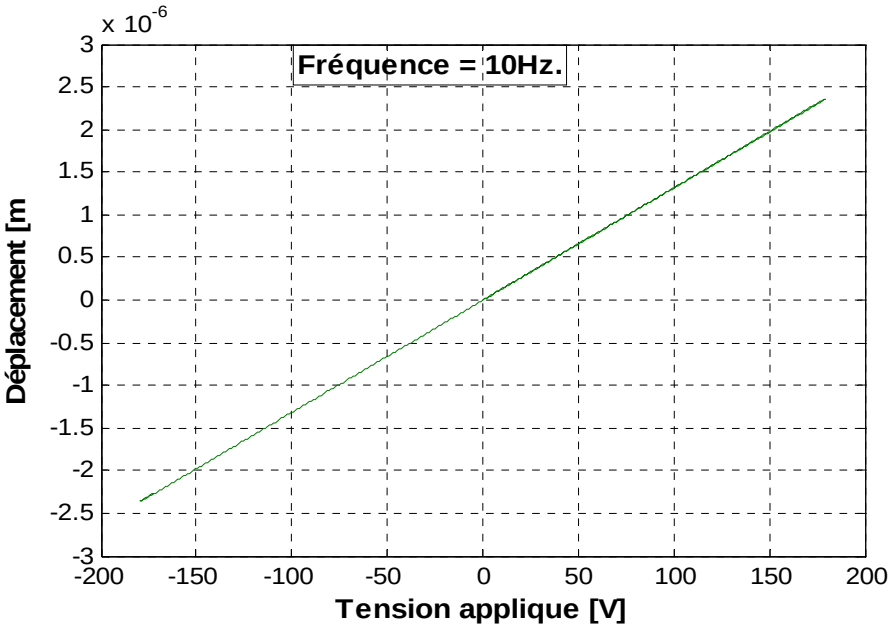


Figure.III.9. Déplacement *y* en fonction de la tension *u* pour *f=10Hz*.

III.2.3.3.2.L'effet du paramètre *c* (l'amortisseur) :

On fixe la fréquence d'entrée à *100Hz*, et on varie la valeur du paramètre *c*, selon les valeurs simulées sous *Matlab Simulink* , pour ($c = 7.71*10^4$ *kg/s*, $3.71*10^4$ *kg/s*, $3.71*10^3$ *kg/s*).

Les figures (III.10), (III.11) et (III.12), représentent l'effet de l'amortisseur mécanique *c* (résistance en électrique) sur la minimisation des pertes d'hystérésis d'un actionneur piézoélectrique linéaire.

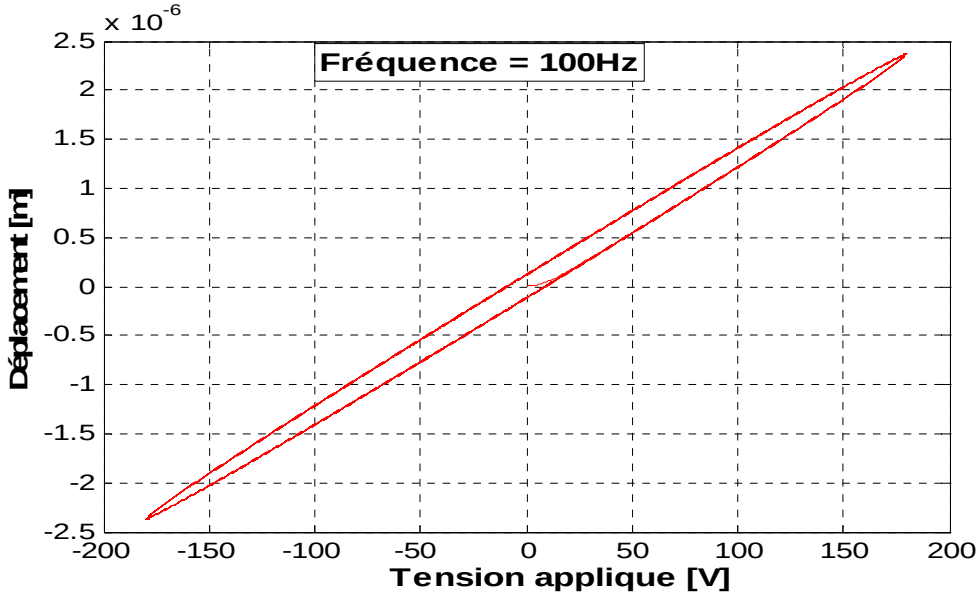


Figure.III.10. Déplacement *y* en fonction de la tension *u* pour $c = 7.71*10^4$ *(kg/s)*.

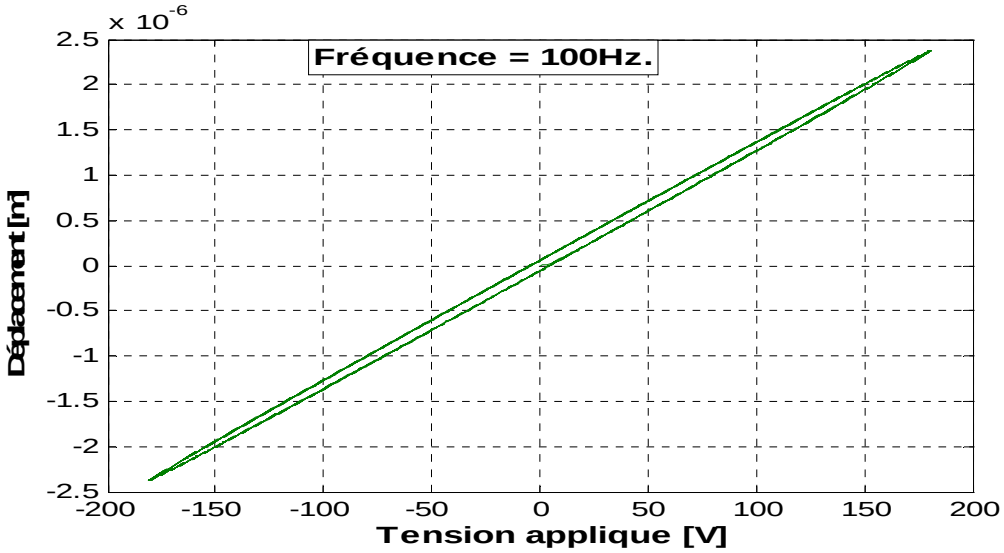


Figure.III.11 Déplacement *y* en fonction de la tension *u* pour**.** $c = 3.71*10^4$ *(kg/s)*.

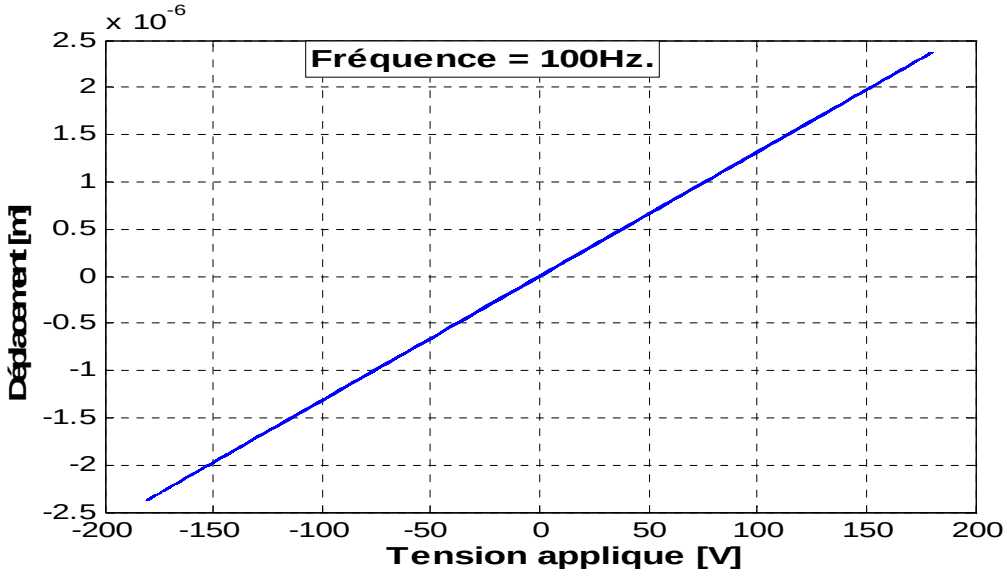


Figure.III.12. Déplacement *y* en fonction de la tension *u* pour $c = 3.71*10^3$ *(kg/s).*

D'après les résultats de simulation, on observe que la surface du cycle d'hystérésis est réduite lorsque le paramètre *c* diminue. Cette diminution traduit ces pertes dissipées sous forme d'énergie dans l'amortisseur en mécanique (résistance en électrique sous effet Joule).

Cette dissipation d'énergie est importante quant à la commande par cycle d'hystérésis surtout les microsystèmes et l'amortissement des vibrations. Pour une bonne vision de la minimisation des pertes d'hystérésis par réduction de la valeur de l'amortisseur *c* du système mécanique (masse, ressort, amortisseur), la figure (III.13), englobe les trois cas précédents de l'influence du paramètre *c*.

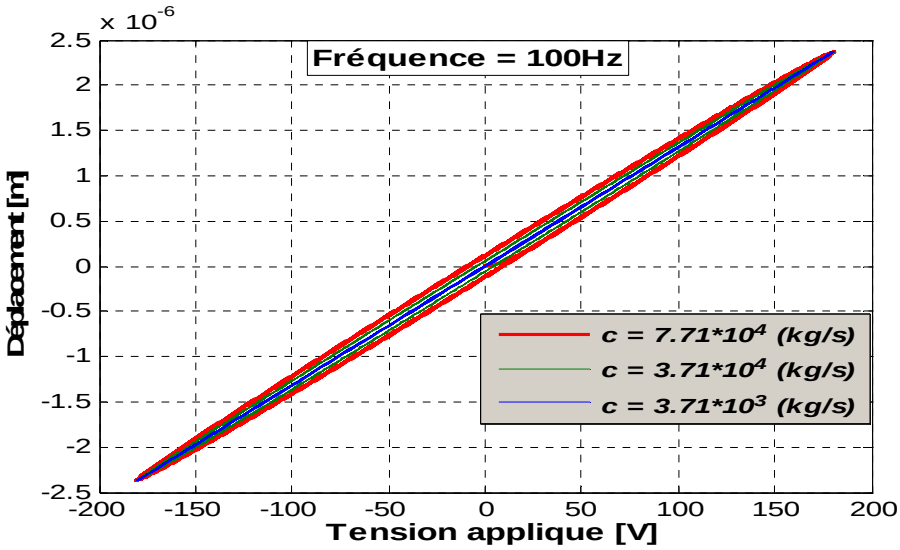


Figure.III.13.L'influence du paramètre *c* sur le cycle d'hystérésis.

Ce modèle mécanique présente une faible valeur de la polarisation rémanente p_r, qui interprète en fait l'absence ou la faible valeur de la polarisation spontanée p_s. Ces dernières sont les caractéristiques essentielles du comportement d'un matériau piézoélectrique. A partir de ces exigences, on propose un modèle analytique de *Landau Devonshire* qui se base sur un modèle mathématique régit par la théorie d'énergie libre de *Landau Devonshire*.

III.3.Modélisation basée sur la théorie d'énergie libre de *Landau Devonshire*:

III.3.1.Introduction:

Ils existent plusieurs modèles dans la littérature pour visualiser le comportement hystérésis des matériaux piézoélectriques.

Dans cette partie, on prend un nouveau modèle mathématique basé sur la théorie de l'énergie libre de *Landau Devonshire* qui permet de modéliser l'hystérésis non linéaire et la saturation de cycle **[40]**. Cependant ces deux caractéristiques sont parmi les inconvénients majeurs des actionneurs piézoélectriques non linéaires qui limitent l'utilisation de ces actionneurs dans le domaine du macro déplacement essentiellement de l'ordre du *centimètre*.

III.3.2. Modèle mathématique :

Nous avons vu dans la section précédente un modèle mécanique qui se base sur les éléments (masse, ressort, amortisseur), mais ce modèle ne précise pas le cycle d'hystérésis réel qui en réalité a une forme non linéaire (pour les vrais matériaux piézoélectriques).

Nous proposons un développement d'un modèle basé sur la théorie de l'énergie libre de *Landau Devonshire* qui vise à décrire les transitions ordre désordre de façon générale, permettant la modélisation d'un cycle d'hystérésis qui décrit la polarisation en fonction du champ électrique.

Cette théorie a été appliquée pour la première fois par *Devonshire* sur les *titanates de baryum*. Le modèle peut être présenté de deux manières: ferroélectrique parfait en parallèle ou en série avec une impédance. La structure parallèle ne permet pas d'expliquer le non retournement de la polarisation observée sur certaines céramiques, par contre la structure en série permet de suivre l'évolution de retournement de la polarisation par ce que le champ électrique appliqué au ferroélectrique parfait étant fixé **[41]**.

On s'intéresse dans un premier temps au comportement ferroélectrique puis nous introduirons une dissipation d'énergie lors de la polarisation. Ce terme de dissipation apparaît lorsqu'on associe le ferroélectrique parfait en série avec une résistance *r* figure (III.14).



Ferroélectrique parfait Ferroélectrique parfait + impédance

Figure III.14: Modèle ferroélectrique série **[41]**.

Pour modéliser cette dissipation d'énergie, nous introduisons le ferroélectrique parfait en série avec une résistance *r* qui interprète la dissipation d'énergie lors de la polarisation du matériau. Ce terme est introduit dans l'équation pour caractériser la relation entre le champ électrique et la polarisation.

III.3.2.1.Développement du modèle analytique :

Un solide cristallin peut être caractérisé thermo dynamiquement par son énergie interne *U*. L'énergie libre *F* peut s'exprimer en fonction de l'énergie interne *U* de la manière suivante :

$$F = U - TS - \sigma\varepsilon \qquad \text{(III.9).}$$

ou:

T : température
S : entropie
σ : contrainte
ε: déformation

D'après la théorie de *Landau Devonshire*, la différentielle de l'énergie interne *U* d'un solide cristallin en fonction des grandeurs mécaniques et électriques peut s'écrire :

$$dU = TdS + EdP + \sigma d\varepsilon \qquad \text{(III.10).}$$

où : *E* est le champ électrique et *P* représente la polarisation.

On peut également exprimer *dF* (différentielle de l'énergie libre) à partir de l'énergie libre de *Helmholtz* ($F = U - TS$) et de la différentielle de l'énergie interne. La différentielle de l'énergie libre peut alors s'écrire sous la forme **[41]** :

$dF = dU - TdS - SdT,$ on remplace *dU* à partir de (III.10), on trouve :

$$dF = -SdT + EdP + \sigma d\varepsilon \qquad \text{(III.11).}$$

Après le développement de l'équation (III.11), la formule de l'énergie libre de la céramique ferroélectrique, déterminée à contrainte constante, est donnée par la relation suivante :

$$F = F_0 + (a/2)*P^2 + (b/4)*P^4 \qquad \text{(III.12).}$$

ou : *a* et *b* sont des constantes et F_0 l'énergie libre à l'état initial.

Il faut choisir $a>0$ et $b>0$, pour que $P \neq 0$.

Le champ électrique *E* est la dérivée de l'énergie libre *F* par apport à la polarisation *P*, est donné par :

$E = \dfrac{\partial F}{\partial P} = aP + bP^3$, on pose : $a = -\alpha$, donc la formule de *E* devient :

$$E = -\alpha P + bP^3 \qquad \text{(III.13).}$$

La polarisation rémanente ± P_r est déduite de l'énergie libre de la céramique. Elle correspond aux minima de la fonction F à $E = 0$. La polarisation rémanente est donc la solution de l'équation : $E = -\alpha P + bP^3 = 0$.

Les solutions sont donc :

$$P_r = 0 \qquad \text{(matériau non polaire)}$$

$$P_r = \pm\sqrt{\frac{\alpha}{b}} \qquad \text{(matériau ferroélectrique)}$$

Le champ coercitif correspond quant à lui à $\frac{\partial P}{\partial E} \to \infty$ pour $E \to Ec$ soit

$Ec = \frac{2}{3\sqrt{3}} * \alpha * \sqrt{\frac{\alpha}{b}}$, on remplace P_r: $\Rightarrow Ec = \frac{2}{3\sqrt{3}} * \alpha * P_r \Rightarrow \alpha = \frac{3\sqrt{3}}{2} * Ec * \frac{1}{P_r}$

On remplace α dans l'équation (III.13), et après quelques simplifications, on trouve :

$$E = -\frac{3\sqrt{3}}{2} * Ec * \frac{1}{P_r} * P + b * P^3 \quad \Leftrightarrow E = \frac{3\sqrt{3}}{2} * Ec * \frac{P}{P_r}\left(b * \left(\frac{2}{3\sqrt{3}} * \frac{P_r}{Ec}\right)P^2 - 1\right)$$

$$\Rightarrow E = \frac{3\sqrt{3}}{2} * Ec * \frac{P}{P_r}\left(\frac{P^2}{P_r^2} - 1\right) \qquad \text{(III.14).}$$

Lorsqu'on associe une résistance r en série avec le ferroélectrique parfait l'équation (III.14) devient :

$$E = r * \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{3\sqrt{3}}{2} * Ec * \frac{P}{P_r}\left(\frac{P^2}{P_r^2} - 1\right) \qquad \text{(III.15).}$$

On peut écrire l'équation (III.15) sous la forme suivante:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{1}{r} * \left[E - \left(\frac{3\sqrt{3}}{2} * Ec * \frac{P}{P_r} * \left(\frac{P^2}{P_r^2} - 1\right)\right)\right] \qquad \text{(III.16).}$$

III.3.2.2. Simulation et validation du modèle de *Landau Devonshire*:

On applique un champ électrique sinusoïdal, $E= E_{max}*sin\ (2*\pi*f*t)$ et avec $f=100Hz$, un champ coercitif $E_c= 5*10^6\ (V/m)$, et un champ maximale $E_{max}= 35*10^6\ (V/m)$, et une polarisation rémanente $P_r= 0.2*10^{-2}\ (C/m^2)$ et la résistance $r = 10^4\Omega$, au modèle (III.16) **[42]**.

A partir de ces donnés, nous développons un programme de simulation sous *Matlab simulink* pour valider ces résultats. La figure (III.15), présente la polarisation *P* en fonction du champ électrique appliqué *E*.

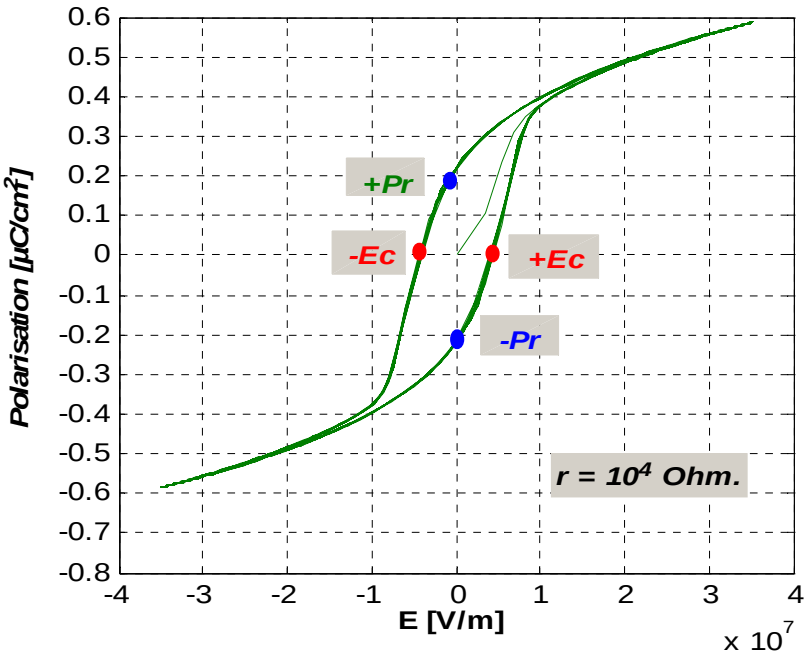


Figure.III.15. Polarisation *P* en fonction du champ électrique *E* appliqué.

III.3.3.Analyse des effets des paramètres:

L'allure du cycle d'hystérésis varie d'un matériau à l'autre. Cette variation est liée directement aux paramètres du cycle. Pour montrer l'effet de ces paramètres, nous allons exécuter le programme de la simulation, en variant un des paramètres concernés et en fixant les autres paramètres.

III.3.3.1.Effet de la fréquence *f* d'entrée:

Les figures (III.16) et (III.17) (III.18), montrent l'effet de la fréquence sur le cycle d'hystérésis. En effet, lorsqu'on diminue la fréquence au dessous de *50Hz*, on voit que la largeur du cycle d'hystérésis se resserre petit à petit.

On simule le modèle de *Devonshire* à des fréquences $f = 20Hz$, $f = 5Hz$, et $f = 1Hz$.

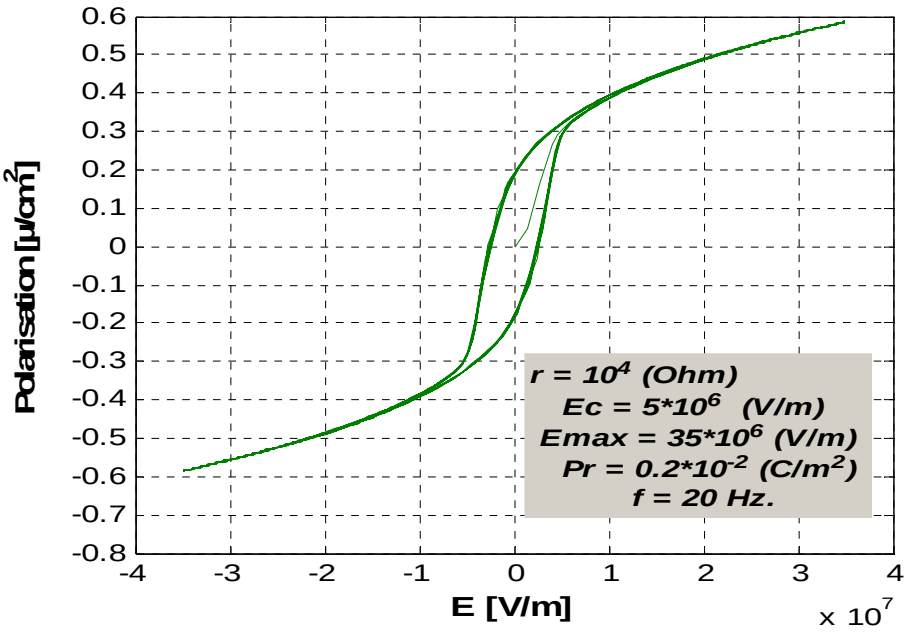


Figure.III.16. Effet de la fréquence sur le cycle d'hystérésis lorsque *f = 20Hz*.

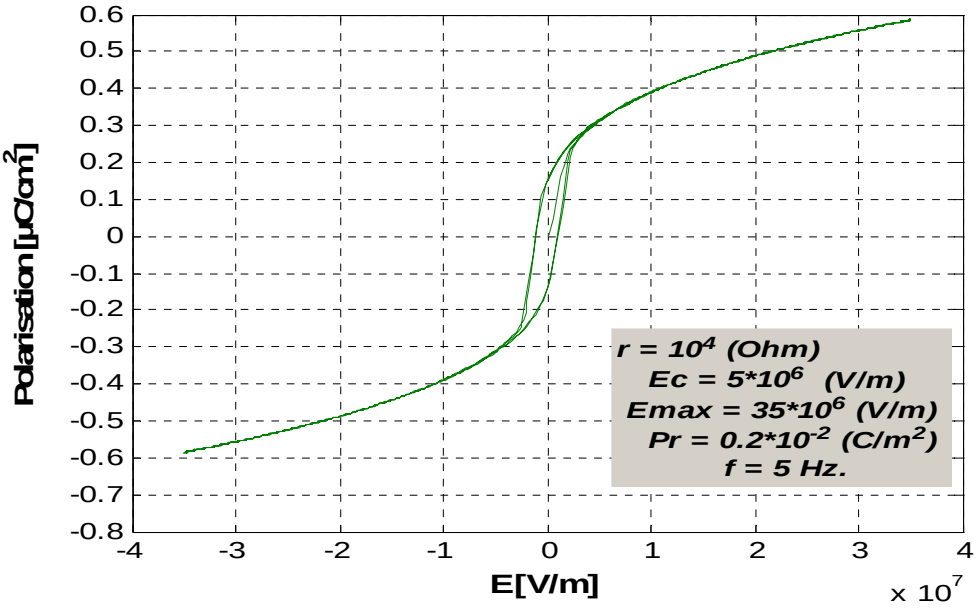


Figure.III.17. Effet de la fréquence sur le cycle d'hystérésis lorsque *f = 5Hz*.

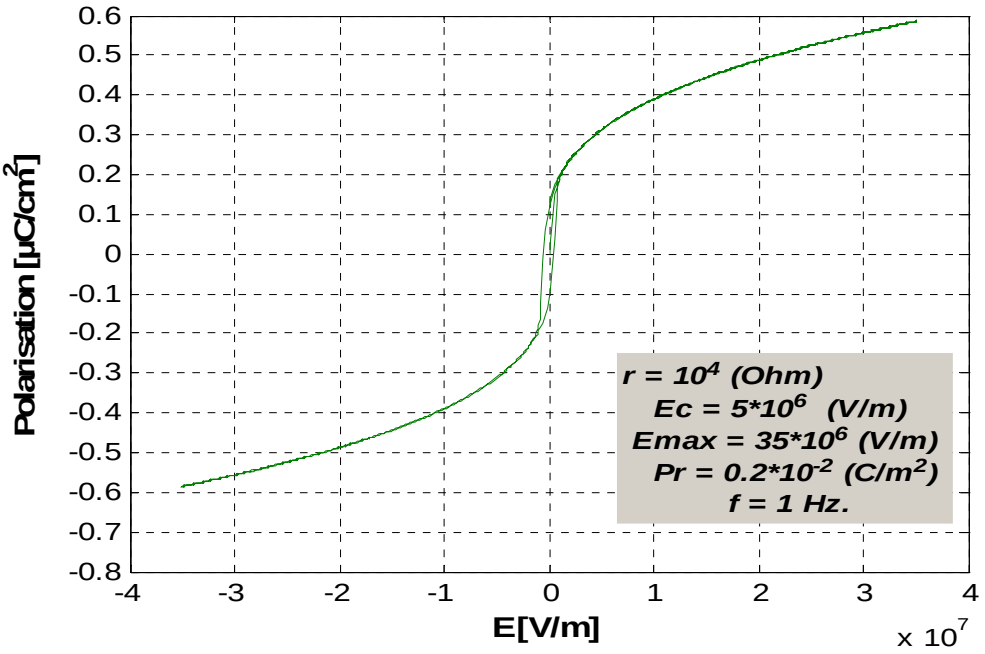


Figure.III.18. Effet de la fréquence sur le cycle d'hystérésis lorsque *f = 1Hz*.

Cette diminution de la fréquence se traduit par une diminution aussi sur le champ coercitif et en même temps sur la polarisation rémanente. La figure (III.19), montre l'influence de la fréquence d'entrée dans le modèle de *Devonshire* pour les trois cas de variation de la fréquence précédente.

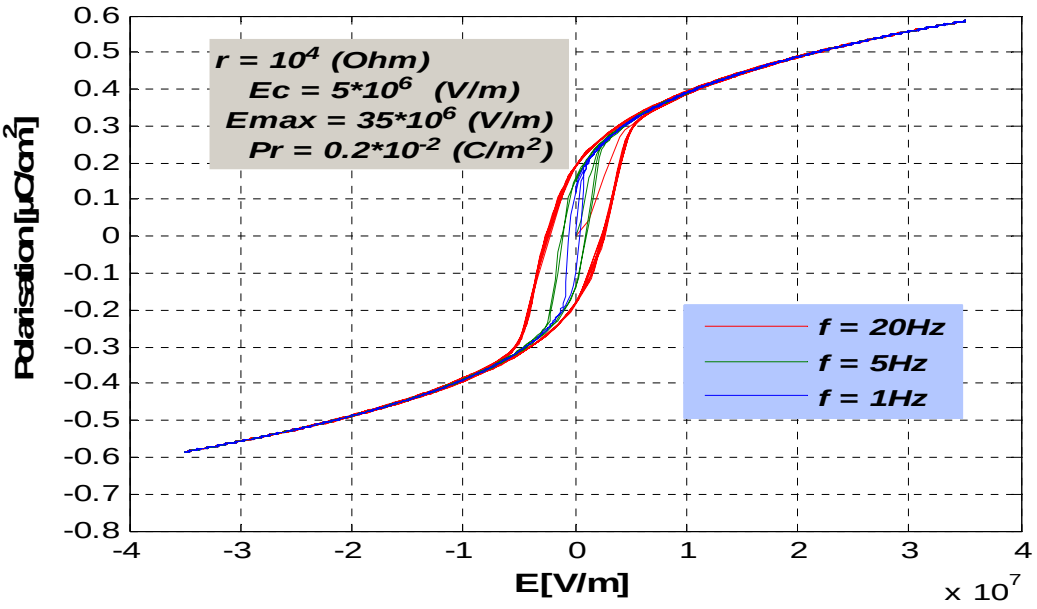


Figure.III.19. Effet de la variation de fréquence sur le cycle d'hystérésis.

III.3.3.2.Effet du paramètre (résistance) *r*:

Le paramètre *r* est une résistance en série, nous varions la valeur de *r* suivant plusieurs valeurs, on remarque que la largeur du cycle diminue en fonction de la diminution de la valeur de *r*, qui représente les pertes d'énergie dans les matériaux piézoélectriques.

Les figures (III.20, 21, 22), montrent l'évolution des surfaces du cycle d'hystérésis qui représentent en fait les pertes dissipées par hystérésis. Ce paramètre *r* représente une résistance dans le modèle électrique ou l'amortissement en modèle mécanique.

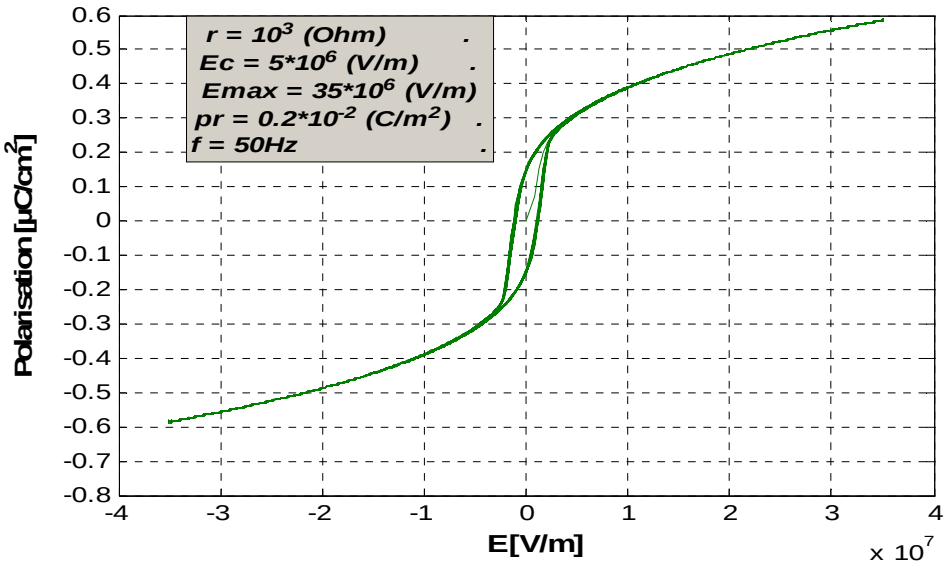


Figure.III.20. L'effet de paramètre *r* sur le cycle d'hystérésis lorsque $r = 10^3 Ohm$.

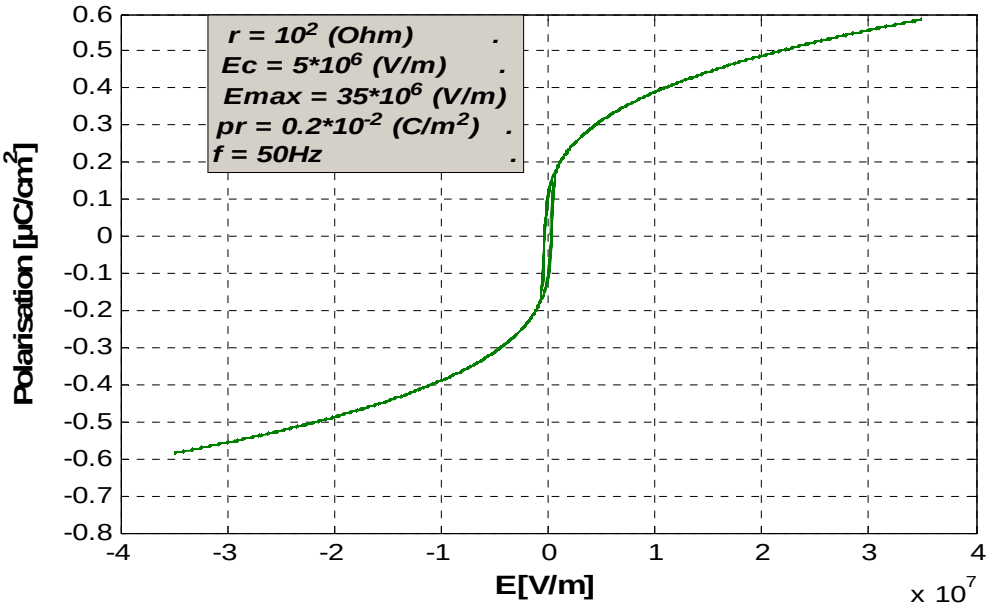


Figure.III.21. L'effet de paramètre *r* sur le cycle d'hystérésis lorsque $r = 10^2 Ohm$.

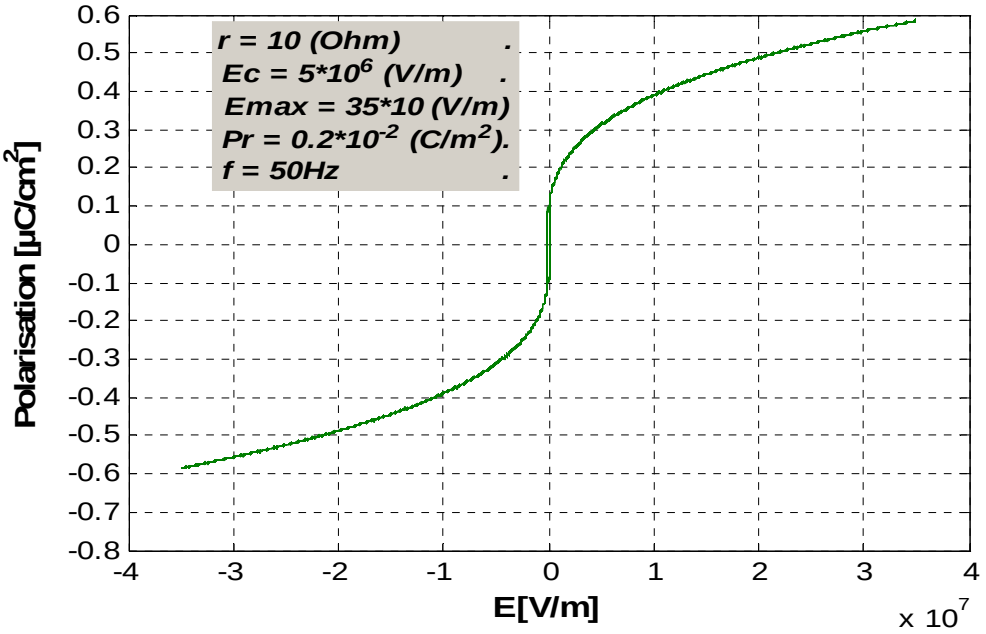


Figure.III.22. L'effet de paramètre *r* sur le cycle d'hystérésis lorsque *r = 10 Ohm.*

D'après les figures précédentes, le paramètre *r* joue un rôle important pour préciser le déplacement de ces actionneurs dans les micros déplacements sans les pertes d'hystérésis et qui en fait représentent aussi les vibrations indésirables. La figure (III.23) montre l'effet de la variation de la résistance *r*, de diminution des pertes d'hystérésis selon la diminution de *r*.

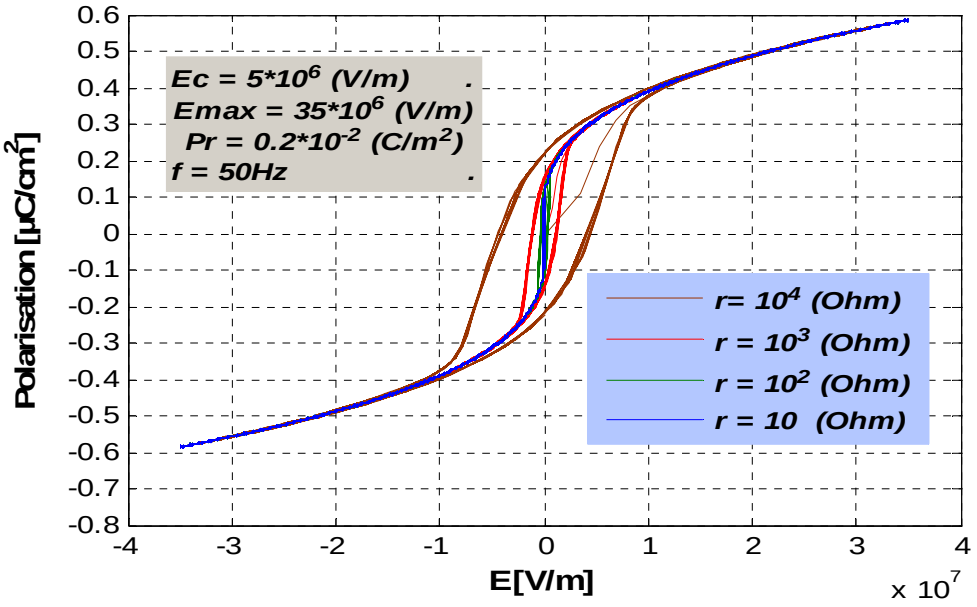


Figure.III.23. L'effet de la variation du paramètre *r* sur le cycle d'hystérésis.

III.3.3.3.Effet du paramètre P_r:

Ce paramètre caractérise la variation de la polarisation, on remarque d'après les figures (III.24, 25, 26, 27), qu'une augmentation du paramètre p_r se traduit par une augmentation de la polarisation rémanente cela signifie que le paramètre P_r détermine le degré d'inclination du cycle (soit la non linéarité du système) et par conséquence le degré de saturation P_s.

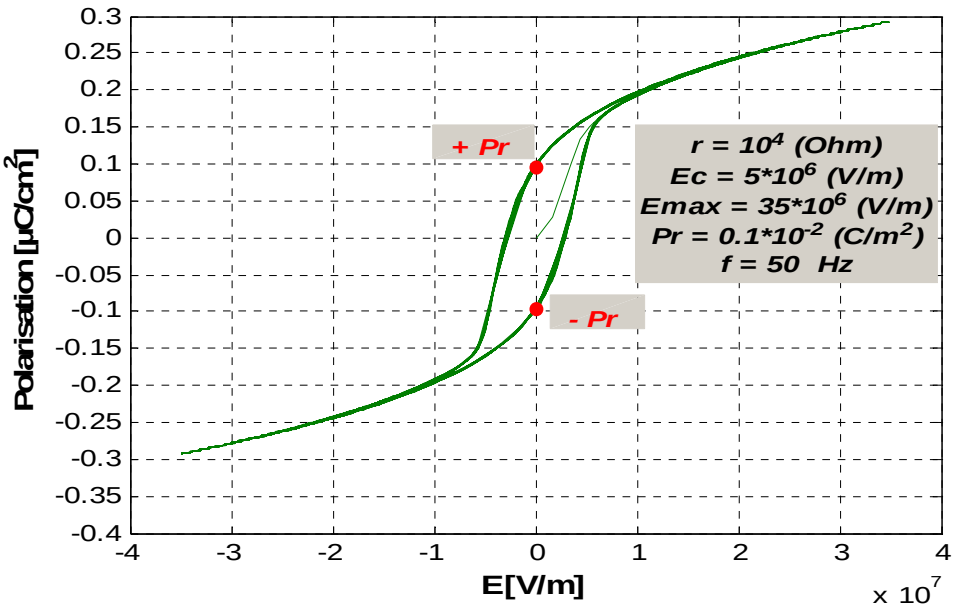


Figure.III.24. Effet du paramètre P_r sur le cycle d'hystérésis pour $P_r = 0.1*10^{-2}$ (C/m^2).

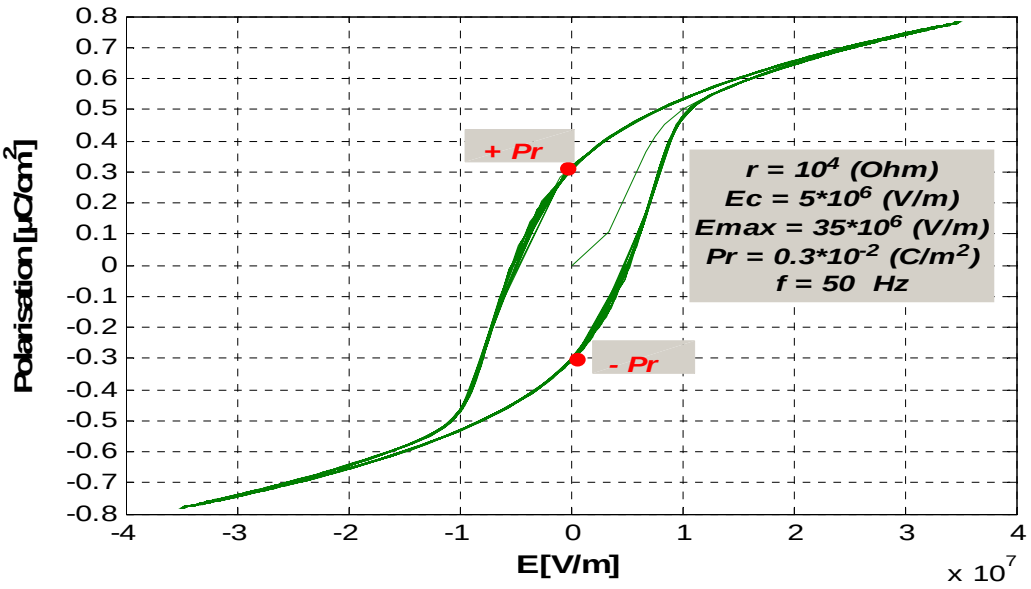


Figure.III.25. Effet du paramètre P_r sur le cycle d'hystérésis pour $P_r = 0.3*10^{-2}$ (C/m^2).

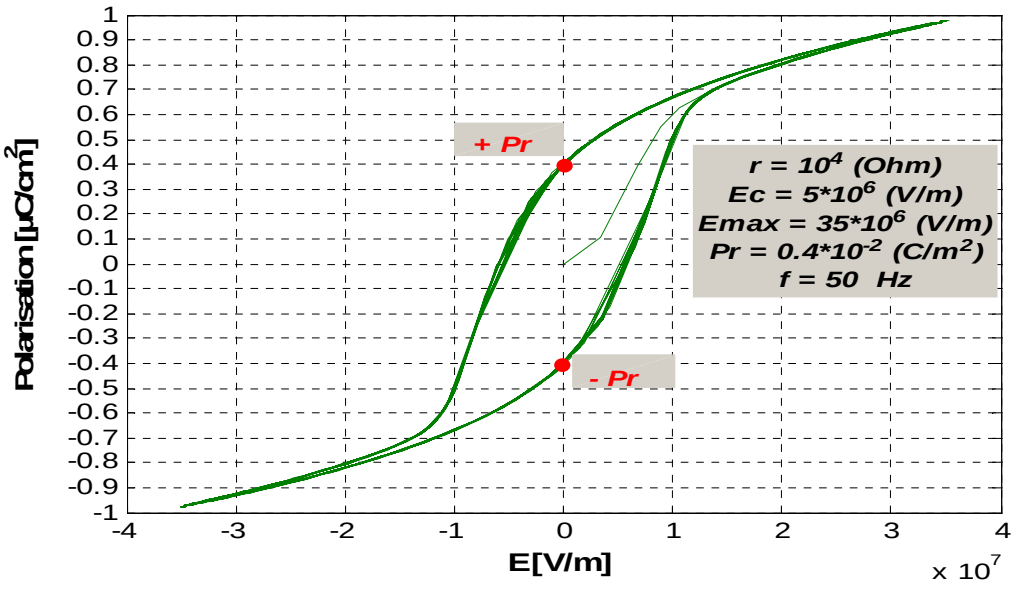


Figure.III.26. Effet du paramètre P_r sur le cycle d'hystérésis pour $P_r = 0.4*10^{-2}$ (C/m^2).

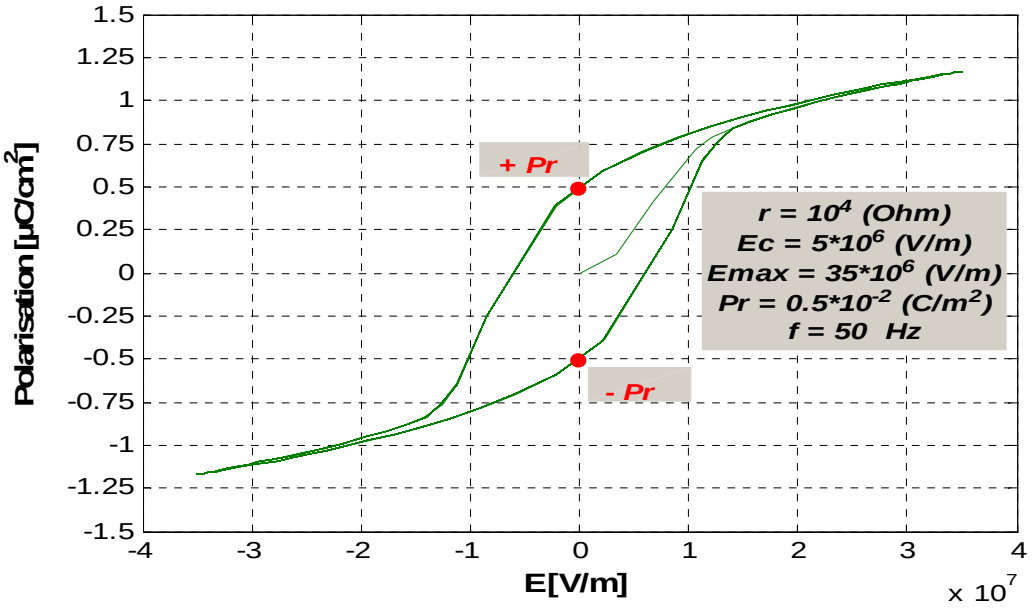


Figure.III.27. Effet du paramètre P_r sur le cycle d'hystérésis pour $P_r = 0.5*10^{-2}$ (C/m^2).

D'après les différentes variations de $P_r = (0.1 \text{ à } 0.5)*10^{-2}$ (C/m^2), présentées dans les figures des résultats de simulation précédemment, le degré d'inclination du cycle augmente proportionnellement avec les pertes d'hystérésis. Ceci interprète le rôle important de ce paramètre P_r, lors de la fabrication d'un transducteur piézoélectrique et caractérise le type

d'actionneur (linéaire ou non linéaire), bien sûr à partir du cycle d'élaboration et de la composition du matériau utilisé.

III.3.4. Linéarisation:

Pour assurer l'utilisation du modèle de ces transducteurs piézoélectriques, soit en micro déplacement ou en macro déplacement, il faut linéariser le cycle d'hystérésis pour une bonne précision du déplacement dans les macros systèmes **[31]**.

Pour cela, un régulateur très utilisé, *P.I.D*, dont la fonction de transfert (III.17) est la suivante a été introduit dans le système,

$$F(s) = kp + \frac{1}{Ti} * \frac{1}{s} + s * Td \qquad \text{(III.17).}$$

ou:

kp: la constante proportionnelle
Ti: la constante intégrale.
Td: la constante dérivée.

On simule le modèle de *Landau Devonshire* par l'application de la fonction de transfert du régulateur *P.I.D* (III.17). Après plusieurs essais, les valeurs optimales du paramètres du régulateur *P.I.D* sont les suivantes: *kp = 0.05*, *Ti = 0.05*, *Td = 0,00001*.

Les figures (III.28), (III.29), (III.30) montrent la linéarisation du cycle d'hystérésis pour différentes valeurs du paramètre de pertes *r* = (10^4, 10^3, 10^2) *Ohm*.

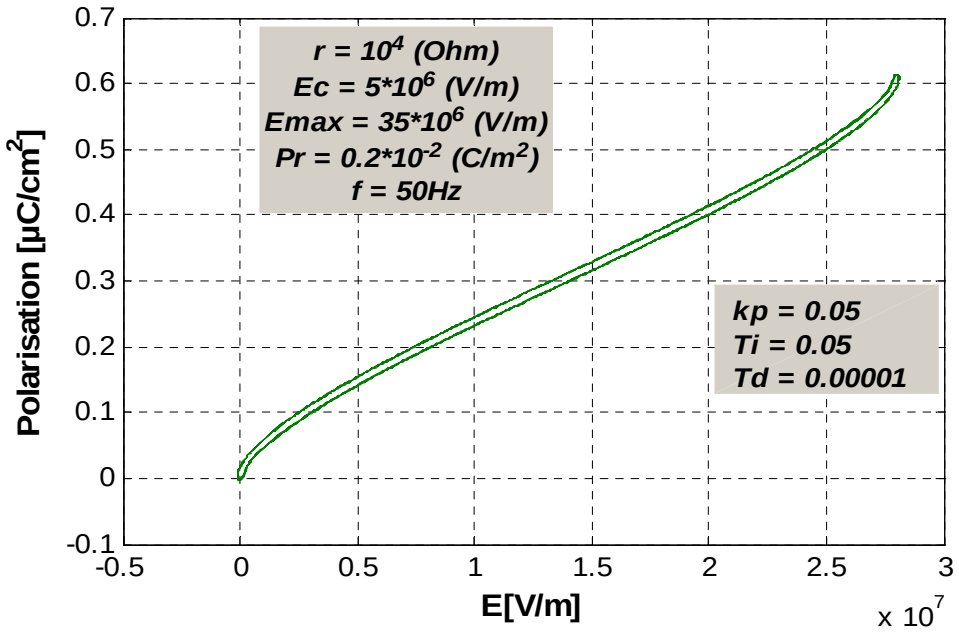


Figure.III.28.L'allure linéaire du cycle d'hystérésis pour : *r = 10^4 (Ohm)*.

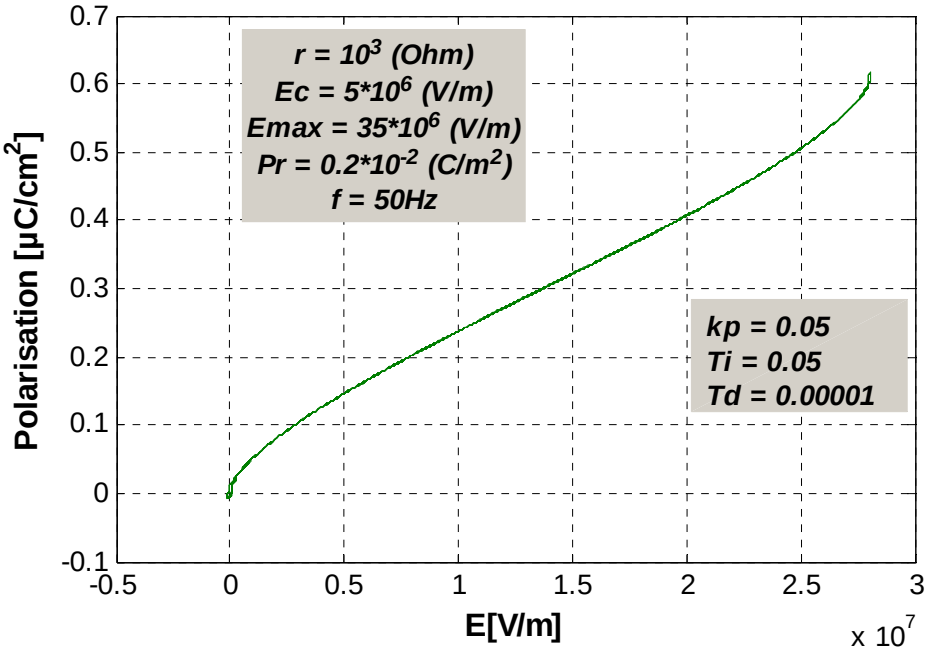


Figure.III.29. L'allure linéaire du cycle d'hystérésis pour : *r = 10³ (Ohm)*.

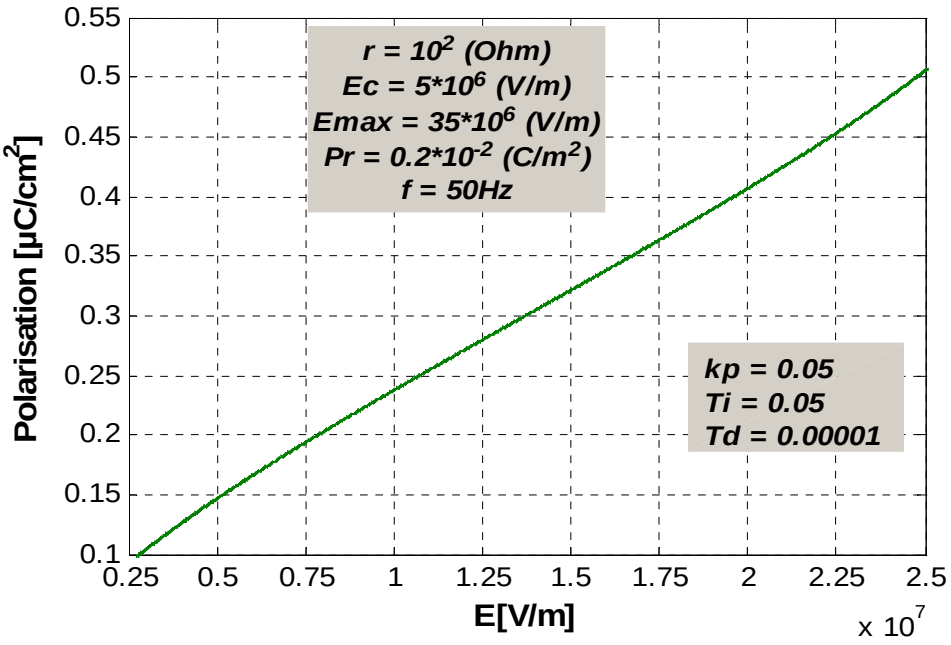


Figure.III.30. L'allure linéaire du cycle d'hystérésis pour : *r = 10² (Ohm)*.

Le régulateur *PID,* dont les valeurs des paramètres sont données dans le paragraphe précédent, améliore énormément la linéarité du cycle. En revanche la combinaison de la variation de la valeur de *r* et du régulateur *PID* nous a permis d'annuler carrément les pertes par hystérésis par conséquence les vibrations indésirables et une parfaite linéarisation de la caractéristique du matériau piézoélectrique essentiellement pour $r=10^3 \Omega$.

III.3.5.Comparaison le modèle simulé avec les résultats expérimental mesurés :

D'après la figure (III.31), qui présente les cycles d'hystérésis mesurés d'un film piézoélectrique ($BaTiO_3$) pour les fréquences (*0.1, 1, 5, 10) Hz*. **[43]**.

On peut identifier les paramètres du modèle mathématique de *Landau Devonshire* simulé précédemment à partir de cette figure. Les valeurs approximatives de ce modèle sont :

$$Ec = 0.6\ (V/m),\ \ Emax = 2.8*10^6\ (V/m),\ \ P_r = 0.85*10^{-4}\ (C/m^2).$$

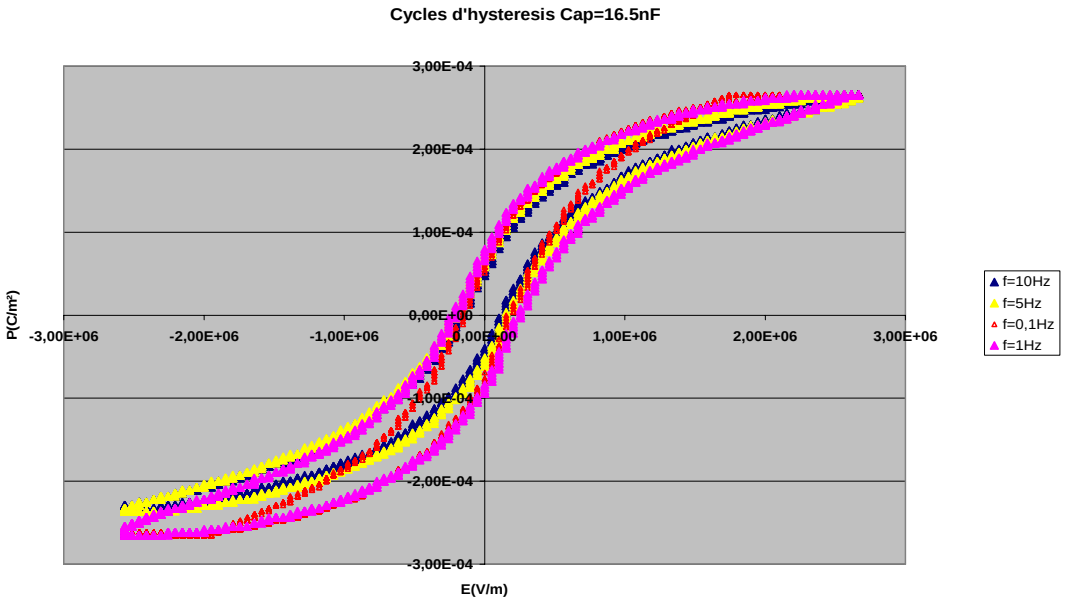


Figure.III.31. Cycle d'hystérésis d'un film piézoélectrique ($BaTiO_3$) mesuré. **[43]**.

On introduit les paramètres identifiés du cycle d'hystérésis mesuré d'un film ($BaTiO_3$) piézoélectrique dans le modèle de *Landau Devonshire*. Après simulation de ce modèle, on observe des cycles d'hystérésis pour les fréquences (*f =10, 5, 1, 0.1*) *Hz*, qui sont montrés dans la figure (III.32).

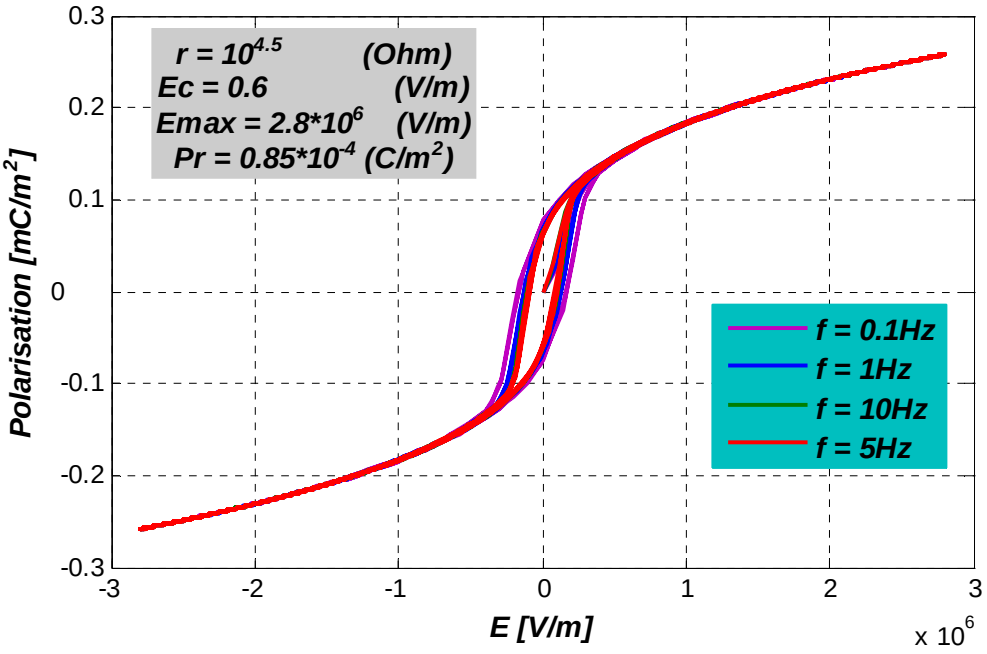


Figure.III.32. Cycles d'hystérésis simulés d'après les paramètres identifiés d'un cycle mesuré d'un film piézoélectrique ($BaTiO_3$).

Par comparaison des deux figures (III.31) et (III.32), on remarque que les courbes ont la même caractéristique non linéaire mais n'est pas de même forme d'émergence, les cycles simulés ont une surface d'hystérésis large au milieu de la courbe et très réduite (ou nulle) vers la saturation. Par contre les cycles mesurés de film ($BaTiO_3$) ont une surface de largeur moyenne étalée sur l'ensemble du cycle. Les degrés d'inclinaison correspondants à la polarisation spontanée sont très proches.

Pour atteindre à la forme des cycles d'hystérésis mesurés de la figure (III.31), on propose d'associer un régulateur *PID*, pour améliorer la forme (l'émergence et le degré d'inclination du cycle) du modèle de *Landau Devonshire.*

On introduit un régulateur *PID* dans le modèle simulé de la figure (III.32), après quelques essais de variation des paramètres du *PID*, on obtient le cycle de la figure (III.33) qui est très proche de la figure (III.31), correspondant à la courbe expérimentale du film ($BaTiO_3$).

Les paramètres de simulation de régulateur *PID*, qui donnent une forme proche de celle mesurés sont ($kp = 0.1,\ Ti = 0.15,\ Td = 0.0001$). La figure (III.33), montre les cycles d'hystérésis simulés, pour les fréquences ($f = 10Hz,\ 5Hz,\ 1Hz,\ 0.1Hz$), améliorés par le régulateur *PID*.

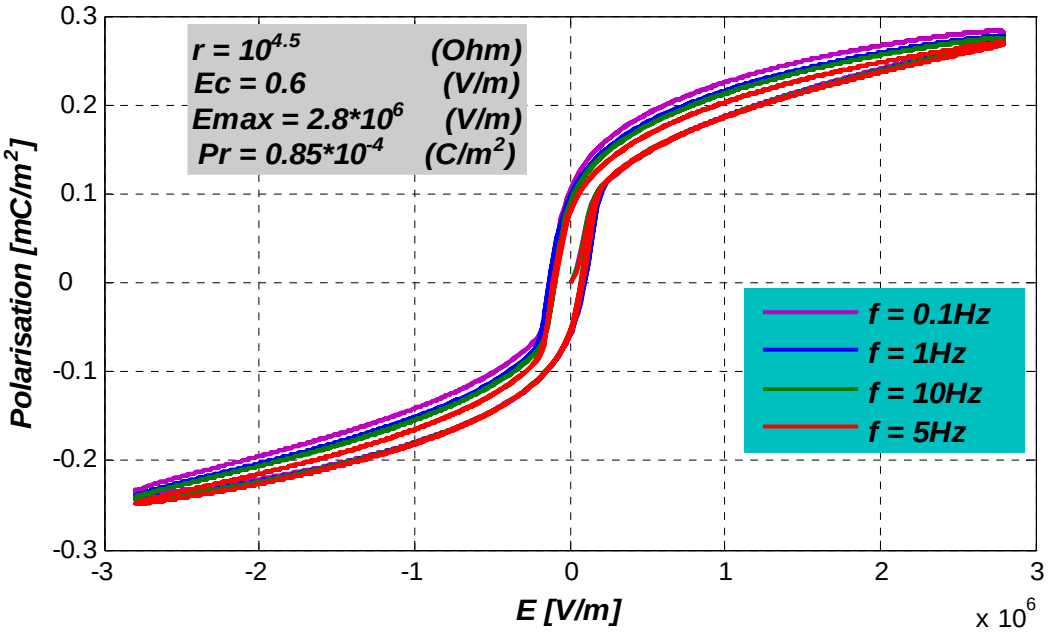


Figure.III. 33 Cycles d'hystérésis améliorés par le régulateur *PID* proche de la courbe expérimentale

III.4.Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons exposé deux modèles du cycle d'hystérésis basé sur un modèle mécanique et un modèle analytique. C'est une caractéristique essentielle des matériaux piézoélectriques.

La comparaison des deux modèles montre l'effet de la différence de forme du cycle sur la commande des systèmes en vue d'un macro et d'un micro déplacement. Pour atteindre un déplacement de l'ordre de (*cm*) avec une bonne précision, la linéarisation du système est nécessaire. Le modèle mécanique est recommandé car celui-ci ne nécessite pas de régulateur de linéarisation. Par contre le deuxième modèle mathématique nécessite une linéarisation par *PID* pour des déplacements de l'ordre du *cm*. En revanche le deuxième modèle est recommandé (sans ajout de régulateur *PID*) pour des déplacements micrométriques.

Les deux modèles peuvent utiliser comme régulateurs pour contrôler les vibrations dans les différents systèmes industriels, l'aéronautique et l'aérospatiale. Les modèles étudiés dans ce chapitre sont utilisés dans le chapitre IV pour le contrôle d'une poutre flexible et l'élimination (l'amortissement) des vibrations indésirables.

Chapitre IV

Positionnement des transducteurs piézoélectriques dans système de contrôle intélligent

IV.1.Introduction:

Dans beaucoup de cas, les vibrations représentent des nuisances. Elles sont sources de bruit acoustique et de détérioration du matériel. Qu'il s'agisse de nuisances sonores domestiques, en milieu industriel ou dans l'habitacle de véhicules, des phénomènes relativement complexes sont mis en jeu.

Des travaux de recherche sont en cours pour trouver des techniques permettant de réduire significativement ces nuisances. Le contrôle acoustique et le contrôle vibratoire constituent un véritable enjeu scientifique et technologique dans des nombreux domaines tels que l'automobile, l'aéronautique, l'aérospatiale, l'instrumentation…, **[44].**

Réduire les nuisances sonores, limiter la fatigue des matériaux, ou encore améliorer la stabilité d'un système sont quelques-uns des buts recherchés par ces thématiques aux retombées industrielles considérables **[45]**.

Le contrôle vibratoire tend à limiter l'amplitude des vibrations d'une structure afin d'améliorer ou de fiabiliser son fonctionnement. Le contrôle de vibration d'une structure permet également d'augmenter sa résistance à la fatigue donc d'augmenter sa durée de vie.

Deux familles de solutions sont envisageables:

• Le contrôle passif de vibrations avec des matériaux qui les amortissent (par exemple des matériaux piézoélectriques)

• Le contrôle actif avec des actionneurs qui sont mis en mouvement pour venir contrer ces vibrations **[44, 46]**.

IV.1.1. Les techniques passives:

Cette approche ne nécessite pas d'apport extérieur d'énergie et repose généralement sur une augmentation de l'amortissement intrinsèque de la structure. Ces techniques englobent donc l'utilisation des matériaux absorbants viscoélastiques, mais également l'utilisation de matériaux piézoélectriques connectés à des circuits passifs de dissipation.

Dans ce dernier cas, une part de l'énergie vibratoire de la structure est convertie en énergie électrique par les éléments piézoélectriques puis dissipée dans une impédance électrique adaptée. Ces techniques ne sont cependant efficaces que pour un seul mode de vibration et sont très sensibles à toute dérive des caractéristiques de la structure.

IV.1.2. Les techniques actives:

Le contrôle actif est basé sur l'utilisation de sources extérieures secondaires, acoustiques ou vibratoires, qui, par interactions avec les sources primaires, produisent un signal résultant résiduel minimisé. Plus performantes que les techniques passives, elles sont néanmoins beaucoup plus complexes à mettre en œuvre. Elles reposent généralement sur une chaîne complète de contre-réaction (feedback) intégrant capteurs, système de calcul et actionneurs.

Les capteurs de vibration (ou de pression) disposés sur la structure (ou dans le milieu de propagation) envoient au système de calcul des informations sur son état vibratoire. Ce système de calcul détermine alors en temps réel le signal de commande à appliquer aux actionneurs afin de minimiser la grandeur physique contrôlée (vibration ou pression).

L'adaptabilité de ces techniques face aux dérives des caractéristiques du système ne peut être assurée que par une identification permanente du système en question et nécessite donc un calculateur très performant (microcontrôleur, carte *DSP*,….).

Clairement, ces techniques actives restent handicapées par leurs besoins en encombrement, en masse et en énergie mais elles peuvent s'avérer plus efficaces dans certains cas.

IV.1.3. Les techniques actives passives:

Ces techniques cherchent à concilier les avantages des deux précédentes afin d'obtenir une performance du contrôle sur une large bande fréquentielle.

L'utilisation conjointe des matériaux absorbants (viscoélastique ou piézoélectrique + une impédance dissipative) efficace en haute fréquence et d'un contrôle actif est très efficace en basse fréquence mais souffre des limitations associées à ces deux techniques de contrôle **[44]**.

Enfin, l'acceptation générale de ces nouvelles technologies par les exploitants ordinaires prendra un certain temps. Il est fait certains parallèles avec la mise en oeuvre d'autres technologies; à titre d'exemple, la pénétration des matériaux composites, qui sont maintenant largement acceptés, a pris environ cinquante ans **[44, 47]**.

IV.2.Structures intelligentes:

IV.2.1.Définition des structures intelligentes:

Spillman, *Sirkis* et *Gardiner* ont formulé en *1996* une définition des structures intelligentes en s'inspirant d'un large éventail de sources.

Elle se lit ainsi : Une structure intelligente est une structure non biologique possédant les attributs suivants :

- un but final,
- les moyens et l'obligation d'atteindre ce but.
- un modèle biologique de fonctionnement.

Akhras a distingué cinq composantes de base dans ce modèle biologique de fonctionnement :

A/ Collecte de données (détection tactile) : recueille les données brutes requises pour l'analyse et la surveillance adéquates de la structure.

B/ Transmission des données (nerfs sensoriels) : transmet les données brutes aux unités de commande et de contrôle locales et (ou) centrales.

C/ Centre de contrôle (cerveau) : gère et contrôle tout le système en analysant les données, en tirant les conclusions appropriées et en déterminant les mesures requises;

D/ Données d'instruction (nerfs locomoteurs) : transmettent en retour les décisions et les instructions associées aux membres de la structure;

E/ Dispositifs actionneurs (muscles) : agissent en déclenchant les dispositifs ou les unités de contrôle **[17, 23, 50]**.

La figure (IV.1) illustre un exemple simple de structure intelligente sous la forme d'une poutre cantilever en aluminium dans laquelle les vibrations sont systématiquement supprimées. Le capteur piézoélectrique convertit la déformation mécanique en signal électrique.

Ce signal est traité par le centre de contrôle qui, dans ce cas simple, inverse essentiellement le signal et l'amplifie. Le nouveau signal est alors transmis au dispositif actionneur, un autre matériau piézoélectrique qui convertit l'énergie électrique en énergie mécanique pour amortir les vibrations. **[52]**.

IV.2.2. Avantages d'applications:

Les applications des structures intelligentes apporteront des avantages à l'industrie et à ses exploitants par exemple. La surveillance continue, notamment la surveillance de l'état, des dommages ainsi que la possibilité de les atténuer et de les réparer, n'est pas le seul avantage escompté.

En voici d'autres :

1- Augmentation du confort des passagers et de l'équipage par la diminution des vibrations et du bruit dans les cas de l'aviation par exemple. Amélioration des performances de l'aéronef par optimisation de l'aérodynamique et des surfaces de sustentation en fonction de la mission et du profil de vol.

2- Prolongation de la durée de vie structurelle des systèmes et des composants.

3- Amélioration de la précision et de la capacité de détection des capteurs électro-optiques et infrarouges embarqués.

Tous ces avantages entraîneront soit une diminution des coûts de construction et d'utilisation, soit une augmentation des performances de l'ensemble du système considéré. Il est important de faire remarquer que d'autres véhicules, notamment les trains, les camions et les navires, peuvent aussi tirer avantage de ces technologies.

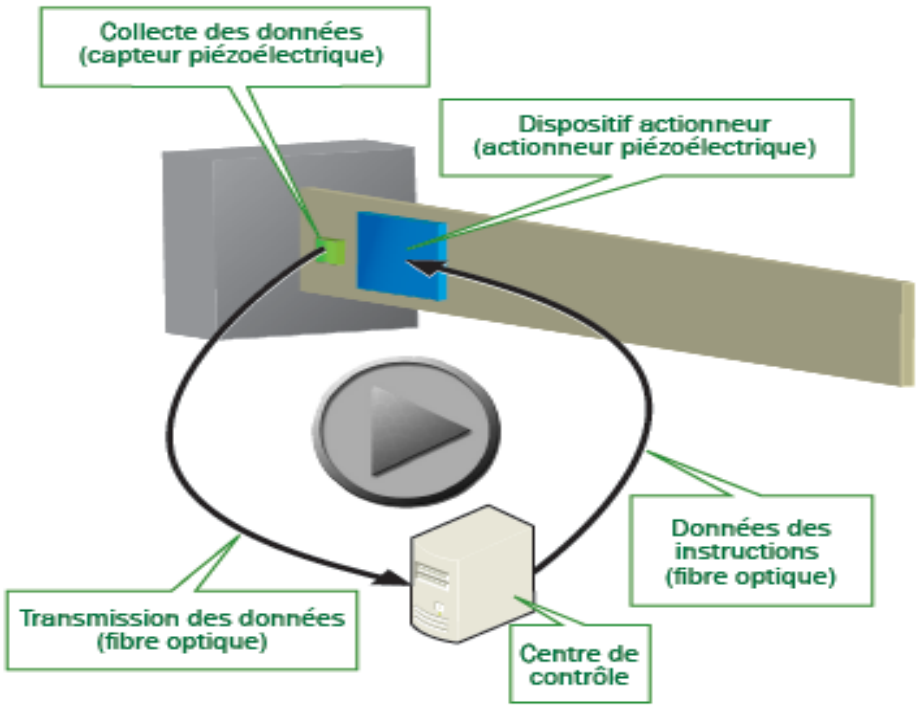


Figure.IV.1 : Suppression de la vibration d'une poutre cantilever grâce à l'approche de la structure intelligente **[52]**.

IV.2.3.Secteurs d'application:

On peut distinguer quatre secteurs d'application des technologies des structures intelligentes : la surveillance des matériaux composites, la suppression des vibrations structurales, la suppression du bruit et le contrôle de la déformation des surfaces **[52]**.

IV.2.3.1.Surveillance des matériaux composites:

Une méthode de surveillance des structures composites consiste à tirer avantage de leur construction en couches minces et des récents perfectionnements apportés aux techniques des cartes de circuit imprimé. Il est ainsi possible d'intégrer des capteurs de faible coût à une structure composite avec une incidence minime sur son intégrité générale.

Chang et *Lin* ont proposé un exemple de cette technique de surveillance sous la forme des *S.L* (Smart Layers), illustrées dans la figure (IV.2) **[52]**.

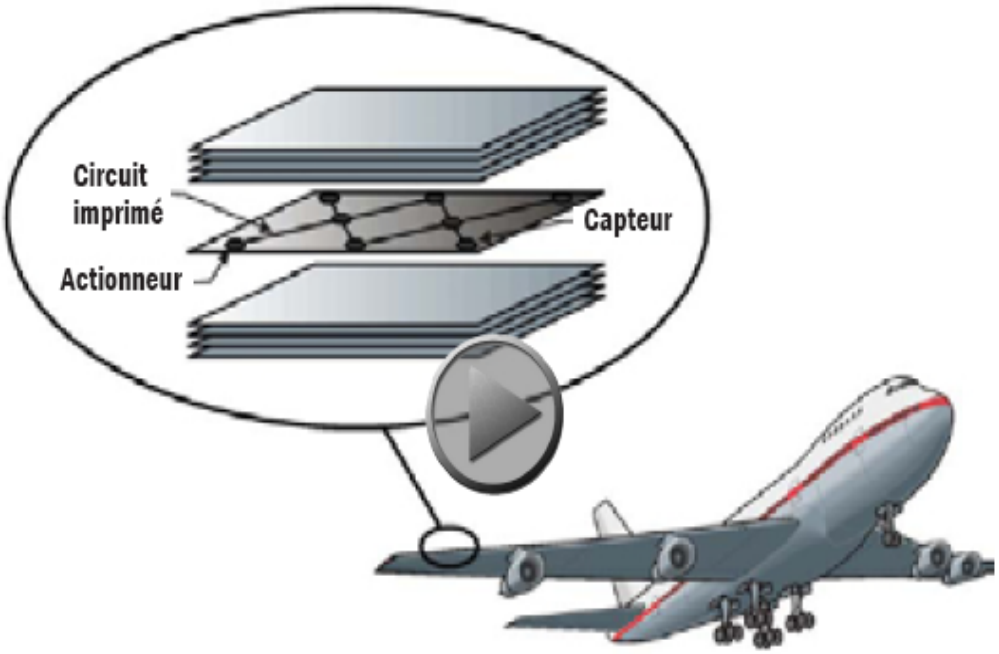


Figure.IV.2 : Intégration de matériaux intelligents dans une structure composite au moyen de la technologie des circuits imprimés **[52]**.

Cette méthode a recours à une combinaison d'actionneurs et de capteurs pour déceler toute modification du matériau composite. En excitant le matériau composite, l'actionneur génère des ondes grâce auxquelles le capteur détectera tout changement dans la structure initiale.

Lorsqu'une nouvelle crique apparaît ou qu'une crique déjà présente s'agrandit, le modèle de propagation des ondes est modifié et signalé le changement. La démonstration de cette méthode a été faite au cours de quelques expériences en *2006* et montré que des capteurs piézoélectriques intégrés pouvaient détecter des criques d'une taille aussi minuscule que *0,1mm* **[52].**

IV.2.3.2.Suppression des vibrations structurales:

En *2005*, *Eurocopter* a effectué et réussi un vol de démonstration à l'aide d'un hélicoptère *BK117* muni d'un rotor principal dont le bord de fuite des pales était activé par des matériaux piézoélectriques. On s'attend à ce que ce genre de système soit mis en oeuvre à une date aussi rapprochée que *2012*.

L'incorporation de dispositifs spéciaux de contrôle adaptatif des vibrations constitue une autre approche. Ces dispositifs font appel à des matériaux piézoélectriques afin de moduler la rigidité, l'amortissement et (ou) la masse d'un système dynamique.

Le ressort intelligent du *CNRC* (Conseil national de Recherches du Canada), qui a été mis à l'essai sur un hélicoptère pour contrôler les vibrations du rotor principal, en est un bon exemple.

Il a cependant bien d'autres applications possibles dans les hélicoptères comme dans les aéronefs à voilure fixe, notamment un montage adaptatif du moteur ou de la boîte de transmission, l'isolation du plancher de la soute du fuselage dans les aéronefs cargos et la suppression adaptive des vibrations des sièges.

Les résultats des essais en soufflerie ont montré que le contrôleur adaptatif du rotor principal d'un hélicoptère pouvait générer une diminution globale du bruit de *11,9 dB* dans des conditions de vent variables **[52]**.

IV.2.3.3.Suppression du bruit:

La troisième application vise le confort et le bien-être des utilisateurs. Grâce à des interactions appropriées avec la structure, on peut supprimer le bruit produit dans la cabine par les moteurs, les hélices et les rotors d'hélicoptère.

L'approche du *ASAC* (Active Structural Acoustic Control), ou contrôle acoustique à structure active utilise des haut-parleurs intégrés à la structure pour combattre le bruit avec du bruit. Des microphones disséminés dans la cabine capteront le bruit et des actionneurs fixés à des endroits stratégiques du fuselage moduleront la réaction structurale et assourdiront les sons de basse fréquence **[52]**.

IV.3. Positionnement d'un transducteur piézoélectrique sur une poutre flexible:

D'après les techniques précédentes des différents contrôles, on considère une poutre flexible, et un capteur piézoélectrique comme élément de mesure (mesure des vibrations) placé sur la poutre et un actionneur piézoélectrique (comme élément de contrôle).

IV.3.1Modele mathématique:

Dans cette partie, on propose un modèle mathématique d'une poutre flexible, qui est une équation différentielle de quatrième ordre.

IV. 3.1.1.Fonction de déplacement:

Plusieurs recherche et études sont effectuées pour atteindre un modèle mathématique par éléments finis qui développe et améliore la distribution des transducteurs piézoélectriques sur différentes formes de poutre pour avoir un système bien contrôlé et bien précis.

A ce point là, on considère une poutre d'alluminum à structure flexible de la figure (IV.3)

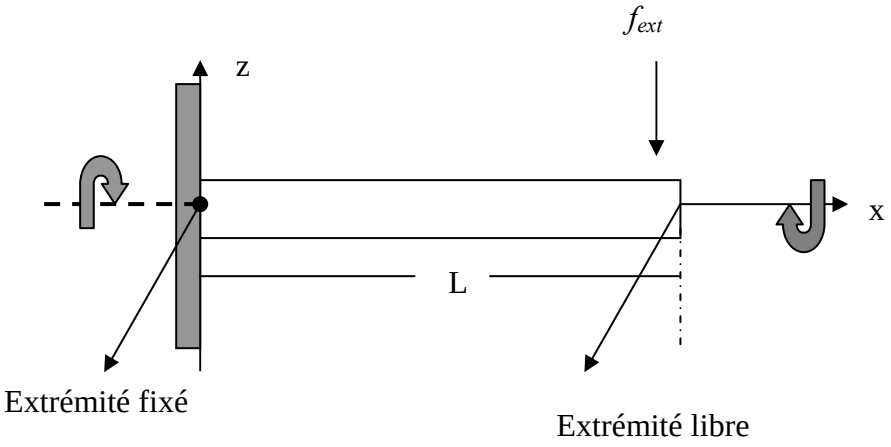


Figure.IV.3. Poutre à structure flexible **[53]**.

Les caractéristiques d'un élément de la poutre sont présentées dans la figure (IV.4) suivante:

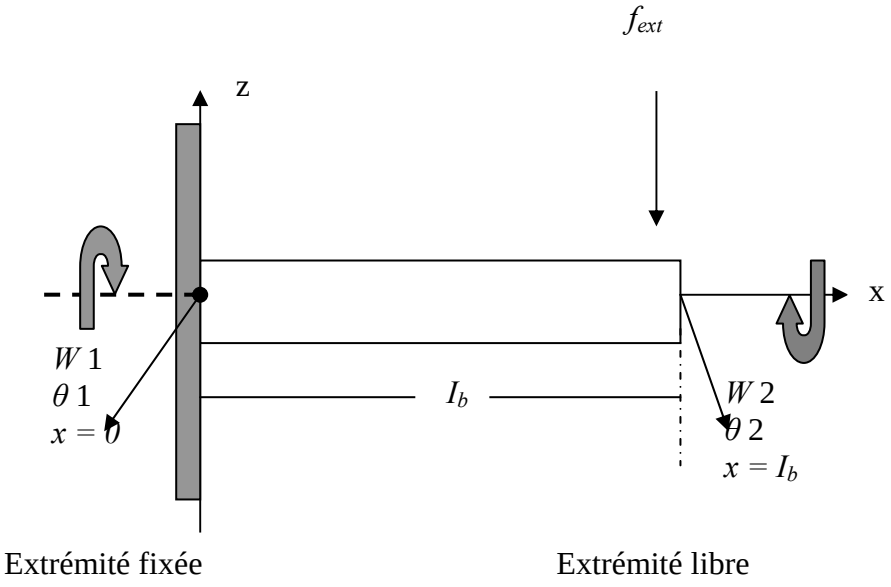


Figure.IV.4. Elément d'une poutre à structure flexible **[53]**

D'après **[53]**, la poutre à une équation différentielle du quatrième ordre elle est sous la forme suivante:

$$c^2 \frac{\partial^4 w(x,t)}{\partial^4 x} + \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial^2 x} = 0 \qquad \text{(IV.1).}$$

Où :

$W(x, t)$: est la fonction de déplacement.

x : est la distance par apport à l'extrémité fixe.

t : est le temps.

c : est une constante qui est donnée par:

$$c = \sqrt{EI / \rho A_T}$$

Où :

E : est le module d'élasticité d'Young.

I : est le moment d'inertie.

ρ : est la masse volumique.

A_T : est la surface de la poutre.

Les dimensions et les propriétés de la poutre et de l'élément capteur/actionneur piézoélectrique sont données dans les tableaux (IV.1), (IV.2) suivants:

Paramètres (avec unité)	symbole	Valeurs numériques
Longueur (m)	l_b	*0.125*
La largeur (m)	b	*0.024*
Epaisseur (mm)	t_b	*0.5*
Module d'Young (Gpa)	E_b	*193.06*
Masse volumique (kg/m^3)	ρ_b	*8030*
Constantes d'amortissement	α, β	*0.001, 0.0001*

Tableau.IV.1. Propriétes de la poutre à structure flexible **[54]**.

Paramètres (avec unité)	symbole	Valeurs numériques
Longueur (m)	l_p	*0.125*
La largeur (m)	b	*0.024*
Epaisseur (mm)	t_a, t_s	*0.5*
Module d'Young (Gpa)	E_p	*68*
Masse volumique (kg/m^3)	ρ_p	*7700*
Constante de déformation piézoélectrique (Vm/N)	d_{31}	*125e-12*

Tableau.IV.2. Propriétes du capteur/actionneur piézoélectrique **[54]**.

D'après l'équation (IV.1), la solution de cette équation différentielle est de la forme suivante:

$$W(x) = a_1 + a_2x + a_3x^2 + a_4x^3 \qquad \text{(IV.2).}$$

Où, a_1, a_2, a_3, a_4, sont des constantes déterminées par application des conditions initiales et finales aux extrémités de la poutre.

D'après la figure (IV.4), les conditions aux extrémités sont:

$$w(x) = w_1 \ et \ \frac{\partial w}{\partial x} = \theta_1 \ \ quand \ \ x=0.$$

$$w(x) = w_2 \ \text{ et } \ \frac{\partial w}{\partial x} = \theta_2 \ \ quand \ \ x= I_b.$$

On remplace ces conditions dans (IV.2), on obtient l'équation suivante:

$$\begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \end{bmatrix} = \frac{1}{I_b^3} \begin{bmatrix} I_b^3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & I_b^3 & 0 & 0 \\ -3I_b & -2I_b^2 & 3I_b & -I_b^2 \\ 2 & I_b & -2 & I_b \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} w_1 \\ \theta_1 \\ w_2 \\ \theta_2 \end{bmatrix} \qquad \text{(IV.3).}$$

Où, w_1, θ_1, et w_2, θ_2, sont le nombre de dégrée de liberté pour les deux extrémités (fixé *1*) et (libre *2*) respectivement.

On remplace les paramètres de l'équation (IV.2), on obtient l'équation suivante:

$$[w(x)] = [N^T] * [q] \qquad \text{(IV.4).}$$

Où,

$$N = \begin{bmatrix} 1 - 3\frac{x^2}{I_b^2} + 2\frac{x^3}{I_b^3} \\ x - 2\frac{x^2}{I_b} + \frac{x^3}{I_b^2} \\ 3\frac{x^2}{I_b^2} - 2\frac{x^3}{I_b^3} \\ -\frac{x^2}{I_b} + \frac{x^3}{I_b^2} \end{bmatrix}, \qquad q = \begin{bmatrix} w_1 \\ \theta_1 \\ w_2 \\ \theta_2 \end{bmatrix}$$

IV.3.1.2. L'équation dynamique d'un élément de la poutre:

L'équation dynamique de mouvement d'un élément de la poutre est donnée par **[53]**:

$$M^b \ddot{q} + K^b q = f_{ext}^b(t) \qquad \text{(IV.5).}$$

Où,

M^b, K^b, f^b sont les matrices de la masse, de la rigidité et de la force extérieure, d'un élément de la poutre.

Les matrices de la masse et de la rigidité sont données par:

$$\left[M^b\right] = \rho_b A_b \int_{I_b} [N]^T [N]\, dx$$

et

$$\left[K^b\right] = E_b i_b \int_{I_b} [N_1]^T [N_1]\, dx \quad \text{Sachant que:}$$

$$[N_1] = [N''] = \frac{\partial^2 N}{\partial^2 x}$$

Où,

A_b : La surface de l'élément de la poutre. $A_b = 2*t_b*b$
i_b : Le moment inertiel de l'élément de la poutre.

D'après les donnés précédentes, l'équation (IV.5) devient:

$$\frac{\rho_b A_b}{420}\begin{bmatrix} 156 & 22I_b & 54 & -13I_b \\ 22I_b & 4I_b^2 & 13I_b & -3I_b^2 \\ 54 & 13I_b & 156 & -22I_b \\ -13I_b & -3I_b^2 & -22I_b & 4I_b^2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \ddot{w}_1 \\ \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{w}_2 \\ \ddot{\theta}_2 \end{bmatrix} + \frac{E_b i_b}{I_b}\begin{bmatrix} \frac{12}{I_b^2} & \frac{6}{I_b} & \frac{-12}{I_b^2} & \frac{6}{I_b} \\ \frac{6}{I_b} & 4 & \frac{-6}{I_b} & 2 \\ \frac{12}{I_b^2} & \frac{-6}{I_b} & \frac{12}{I_b^2} & \frac{-6}{I_b} \\ \frac{6}{I_b} & 2 & \frac{-6}{I_b} & 4 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} w_1 \\ \theta_1 \\ w_2 \\ \theta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1 \\ M_1 \\ F_2 \\ M_2 \end{bmatrix} \qquad \text{(IV.6).}$$

Où, F_1, F_2, M_1, M_2, sont les forces et les moments d'actionnement au noeud *1* et *2* respectivement.

IV.3.1.3.L'équation dynamique d'un élément capteur/actionneur piézoélectrique:

L'équation dynamique de mouvement d'un élément capteur/actionneur piézoélectrique est donnée aussi par:

$$M^p \ddot{q} + K^p q = f_{ctrl}^p(t) \qquad \text{(IV.7).}$$

Où :

M^p, K^p, sont les matrices de la masse, la rigidité de l'élément capteur/actionneur, et f^p est la force de commande (actionnement).

La figure (IV.5) présente un élément capteur/actionneur piézoélectrique qui est constitué de couches minces collées sur un élément de la poutre à structure flexible **[54]**.

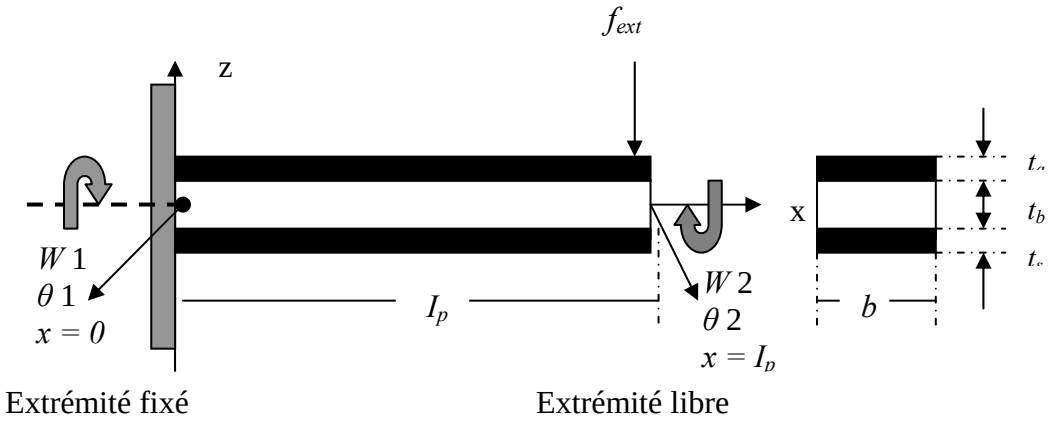


Figure.IV.5. Elément d'un capteur/actionneur piézoélectrique.

Similaire aux notions précédentes de l'élément de la poutre, les matrices de la masse et de la rigidité de l'élément capteur/actionneur piézoélectrique sont données par **[53]**:

$$M^p = \frac{\rho_p A_p}{420}\begin{bmatrix} 156 & 22I_p & 54 & -13I_p \\ 22I_p & 4I_p^2 & 13I_p & -3I_p^2 \\ 54 & 13I_p & 156 & -22I_p \\ -13I_p & -3I_p^2 & -22I_p & 4I_p^2 \end{bmatrix}$$

$$K^p = \frac{E_p i_p}{I_p}\begin{bmatrix} \frac{12}{I_p^2} & \frac{6}{I_p} & \frac{-12}{I_p^2} & \frac{6}{I_p} \\ \frac{6}{I_p} & 4 & \frac{-6}{I_p} & 2 \\ \frac{12}{I_p^2} & \frac{-6}{I_p} & \frac{12}{I_p^2} & \frac{-6}{I_p} \\ \frac{6}{I_p} & 2 & \frac{-6}{I_p} & 4 \end{bmatrix}$$

Où, $$i_p = \frac{1}{12}bt_a^3 + bt_a\left(\frac{t_a + t_s}{2}\right)$$

IV.3.1.4.L'équation dynamique générale du mouvement:

Nous avons vu précédemment les équations dynamiques du mouvement pour l'élément de la poutre et l'élément capteur/actionneur piézoélectrique, à ce point là, on généralise l'équation dynamique qui rassemble les deux (élément capteur/actionneur + élément de la poutre) dans une équation générale de mouvement.

L'équation dynamique est donnée par la relation suivante:

$$M\ddot{q} + Kq = f \qquad \text{(IV.8).}$$

Où,

$$M = M^b + M^p \quad \text{et} \quad K = K^b + K^p \quad \text{et} \quad f = f_{ext} + f_{ctrl}$$

M : est la matrice globale de la masse.
K : est la matrice globale de la rigidité.
f : est la force totale appliquée.

Le système dynamique du deuxième ordre s'écrit alors sous la forme suivante:

$$M\ddot{q} + C\dot{q} + Kq = f \qquad \text{(IV.9).}$$

Où,

$$C = \alpha M + \beta K, \qquad f = f_{ext} + f_{ctrl}$$

$$f_{ctrl} = E_p d_{31} be \int_0^{I_p} N_2 dx * u(t)$$

Où, $e = \dfrac{(t_a + t_b)}{2}$ est la distance entre l'axe naturel de la poutre et la couche piézoélectrique.

$$N_2 = \left[N' = \frac{\partial N}{\partial x} \right]$$

La force f_{ctrl} s'écrit ainsi,

$$f_{ctrl} = h * u(t) \qquad \text{Ou:}$$

$$h = E_p d_{31} be \int_0^{I_p} N_2 dx \Rightarrow h = \begin{bmatrix} -E_p d_{31} be & 0 & E_p d_{31} be & 0 \end{bmatrix} = E_p d_{31} be \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

h est un vecteur constant qui détermine le type et la position de l'actionneur sur la poutre.

Le vecteur qui détermine la position du capteur est exprimé sous la forme suivante:

$$p^T = G_c g_{31} eb \int_0^{I_p} N_1 dx \Rightarrow p^T = \begin{bmatrix} 0 & -G_c g_{31} eb & 0 & G_c g_{31} eb \end{bmatrix} = G_c g_{31} eb \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Où :

G_c : est le gain du signal de conditionnement égale à *100*.

g_{31} : est une constante égale à $g_{31} = d_{31} * E_p$

IV.3.2.Modèle d'espace d'état:

Le modèle d'espace d'état est donné par la relation suivante:

$$\begin{aligned} \dot{X} &= A \cdot x(t) + B \cdot u(t) + E \cdot r(t) \\ y(t) &= C^T \cdot x(t) + D \cdot u(t) \end{aligned} \qquad \text{(IV.10).}$$

Où,

$$A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix}, \qquad B = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}h \end{bmatrix}, \qquad E = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}f_{ext} \end{bmatrix}$$

$$C^T = \begin{bmatrix} 0 & p^T \end{bmatrix} \qquad D = \begin{bmatrix} 0 \end{bmatrix} \qquad \text{(IV.11).}$$

IV.4.Simulation:

On considère la poutre à structure flexible précédente de longueur *L=0.5m* composée de quatre élément égaux, chaque élément à une longueur I_b *= 0.125m*. Ensuite, on fait vibrer cette poutre par l'application d'une force extérieure *fext*.

Les vibrations sont contrôlées par un capteur placé à la sortie du système et un actionneur à l'entrée du système pour contrôler et amortir ces vibrations au niveau de la position *2* puis de la position *4*. La figure (IV.6) montre une poutre à structure flexible avec un actionneur et un capteur piézoélectrique à la position *2*.

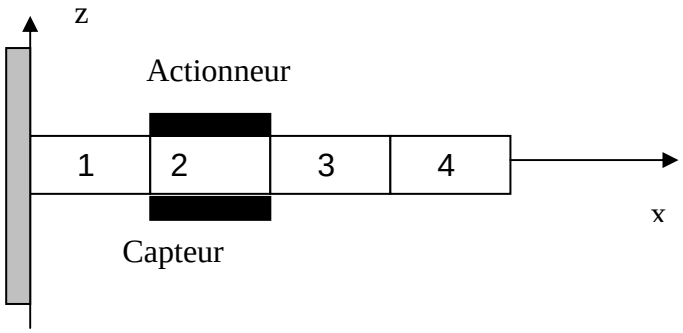


Figure.IV.6. Actionneur/capteur piézoélectrique à la position *2* sur une structure flexible.

D'après l'équation (IV.11), le modèle d'espace d'état du système de la figure (IV.6) est donné par **[53]** :

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -46630 & 0 & -5 & 0 \\ 0 & -434 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \qquad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0.0618 \\ -0.0102 \end{bmatrix}, \qquad E = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 881.75 \\ -332.35 \end{bmatrix},$$

$$C^T = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.0065 & -0.0003 \end{bmatrix} \qquad D = \begin{bmatrix} 0 \end{bmatrix}$$

On applique une tension sinusoïdale à l'entré *u (t)*, et on visualise à la sortie une réponse sous forme de tension détectée par le capteur. La figure (IV.7), montre les vibrations de la poutre sans contrôle.

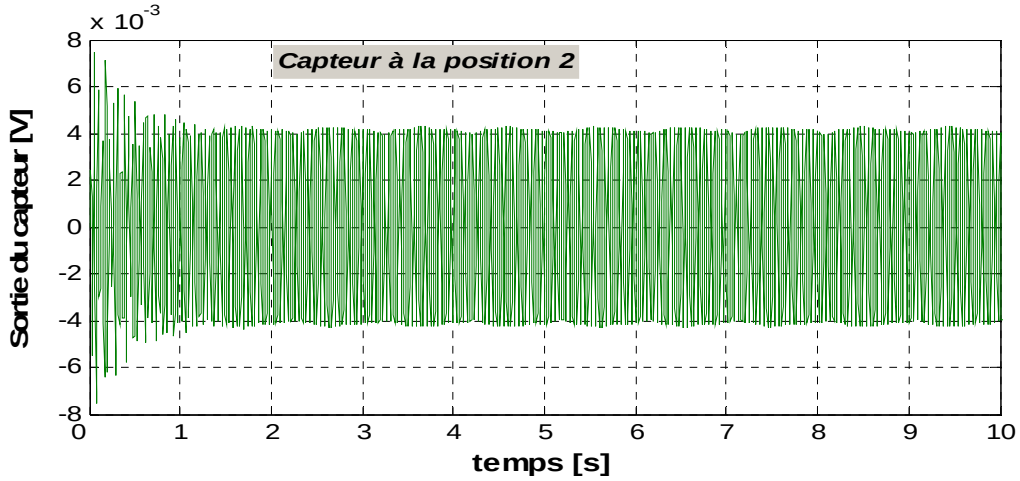


Figure.IV.7. Sortie du capteur *2* avant la commande.

La figure (IV.7) montre l'évolution des vibrations de la poutre avant la commande du système. Pour amortir ces vibrations on introduit un élément de contrôle -l'actionneur- à l'entré du système de la poutre pour réduire ou amortir ces vibrations, figure (IV.8).

Nous avons vu dans le chapitre III deux modèles d'actionneur (linéaire et non linéaire), que nous utilisons comme contrôleur pour amortir et minimiser ces vibrations.

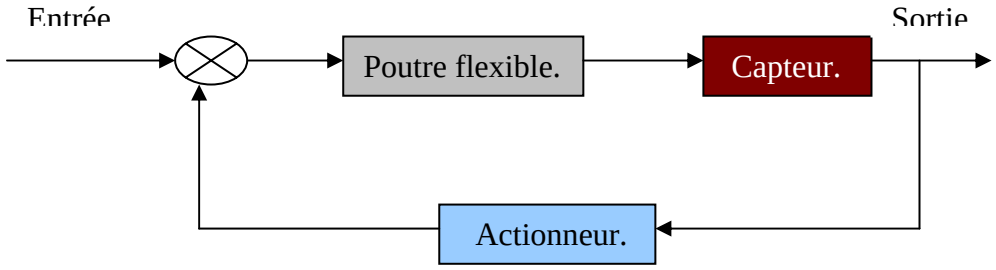


Figure.IV.8. Schéma de principe de vibration d'une poutre flexible contrôlée par un actionneur piézoélectrique.

Les figures (IV.9) et (IV.10), montrent l'effet de l'actionneur sur la poutre dans le cas de l'actionneur linéaire et non linéaire respectivement **[55]**.

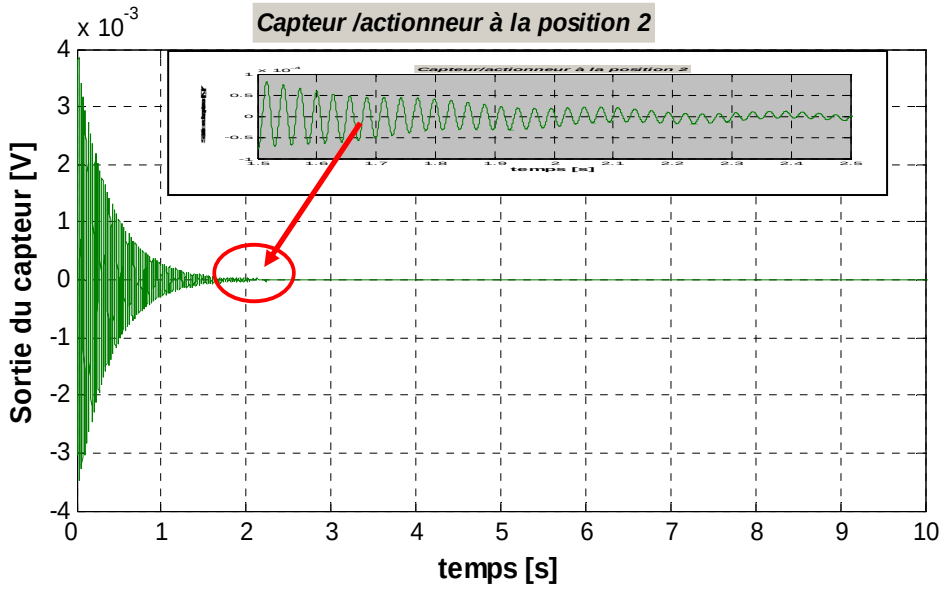


Figure.IV.9. Sortie du capteur *2* avec contrôle (actionneur linéaire)

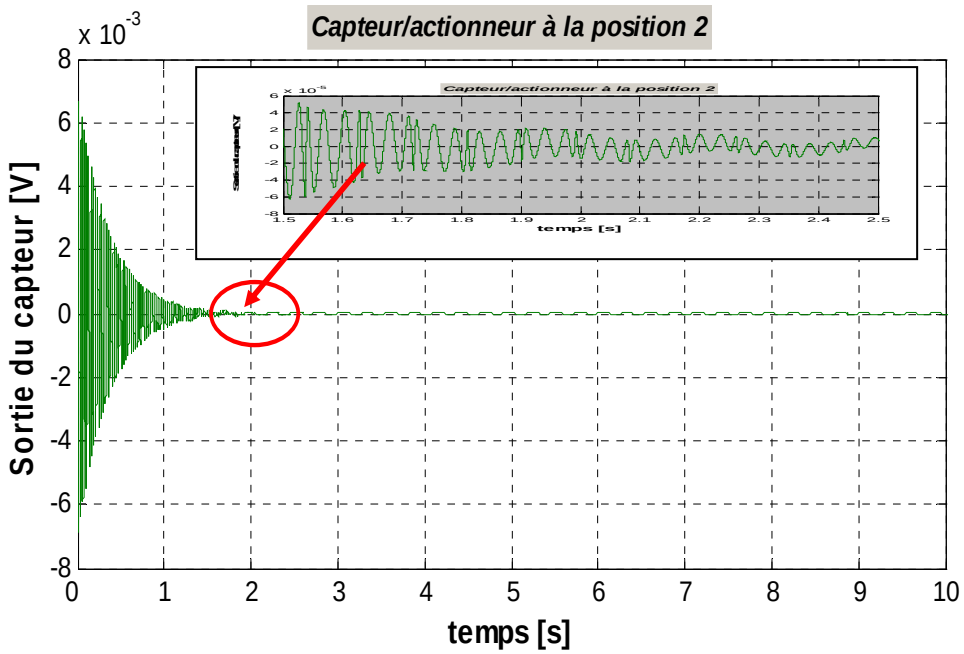


Figure.IV.10. Sortie du capteur *2* avec contrôle (actionneur non linéaire)

Les deux modèles d'actionneurs ont réduit l'amplitude des vibrations de la poutre jusqu'à la suppression totale à partir de l'instant ($t = 1.5\ s$). Cependant pour l'actionneur non linéaire l'amplitude des oscillations est plus importante ($4*10^{-3}$ *Volts* contre $8*10^{-3}$ *Volts*) crête à crête et des résidus d'oscillations sont remarqués après 1,5 s.

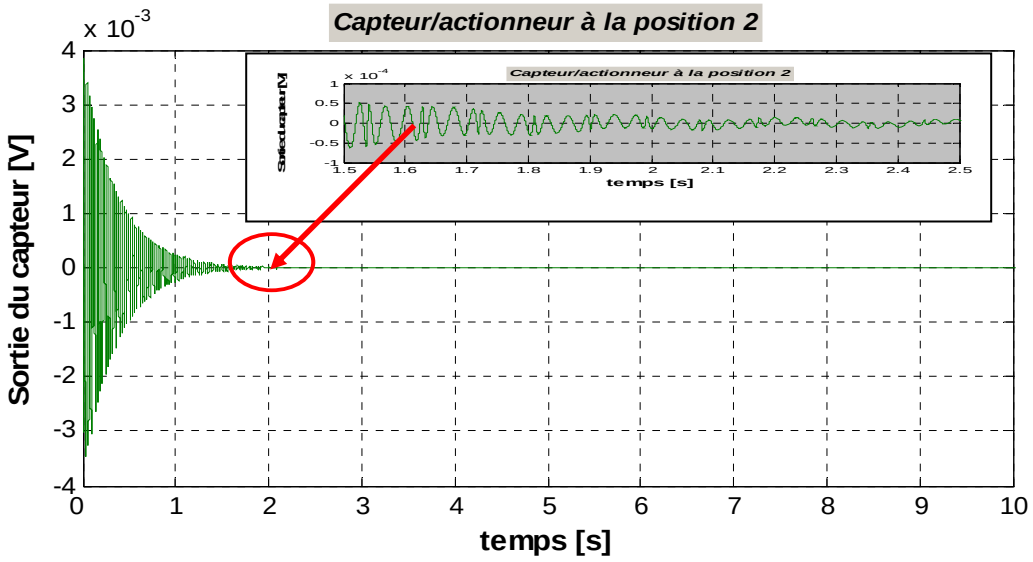


Figure.IV.11. Sortie du capteur 2 avec contrôle (actionneur non linéaire) + *PID*.

Pour améliorer la réponse de l'actionneur non linéaire, on applique le modèle de cycle d'hystérésis linéarisé par le régulateur *PID* de la figure (III.30), du chapitre III correspondant à $r=10^2$ *Ohms*. La figure (IV.11), montre la réponse du capteur après association du régulateur *PID* au modèle de l'actionneur non linéaire.

Dans l'intervalle $t = [1.5\text{-}2.5s]$, l'amplitude des vibrations est réduite davantage. Elle est au dessous de $0.5*10^{-4}$ *V* crête à crête à partir de $t = 1.6s$ ce qui montre la bonne précision pour le deuxième modèle pour les déplacements de l'ordre du *micromètre*, et la rapidité de temps de réponse. Par contre les systèmes d'actionneurs linéaires (modèle linéaire) sont plus précis pour l'actionnement des déplacements de l'ordre du *mm* au *cm*.

Les résultats de simulation montrent donc que la position du capteur/actionneur à l'élément *2* de la poutre flexible, permet de supprimer les vibrations à partir de *t=1,6 s*.

On change la position de l'actionneur/capteur sur la poutre à l'élément *4*. La figure (IV.12), présente la position d'un actionneur/capteur à l'élément *4* de la poutre flexible **[53]**.

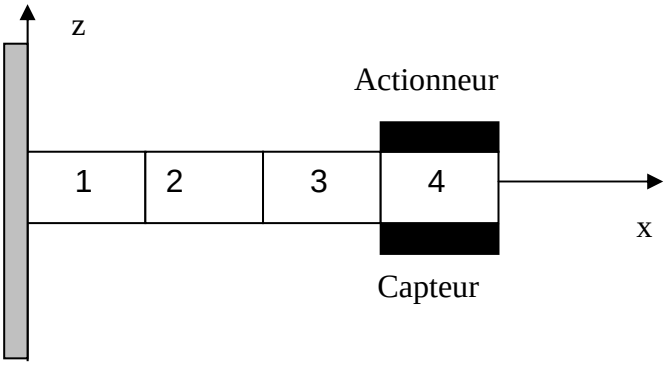


Figure.IV.12. Actionneur/capteur piézoélectrique à la position *4* sur une structure flexible.

Le modèle d'espace d'état de la figure (IV.12), est donné par la matrice et les vecteurs suivants **[54]** :

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -46630 & 0 & -5 & 0 \\ 0 & -434 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0.0998 \\ -0.0104 \end{bmatrix}, \qquad E = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 881.75 \\ -332.35 \end{bmatrix},$$

$$C^T = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.0015 & -0.0000 \end{bmatrix} \qquad D = \begin{bmatrix} 0 \end{bmatrix}$$

On procède à la même démarche que le cas précédent (actionneur/capteur à la position *2*), et on observe les changements qui ont eu lieu entre les deux positions.

La figure (IV.13), montre la réponse du capteur avant l'effet de l'élément de contrôle (actionneur).

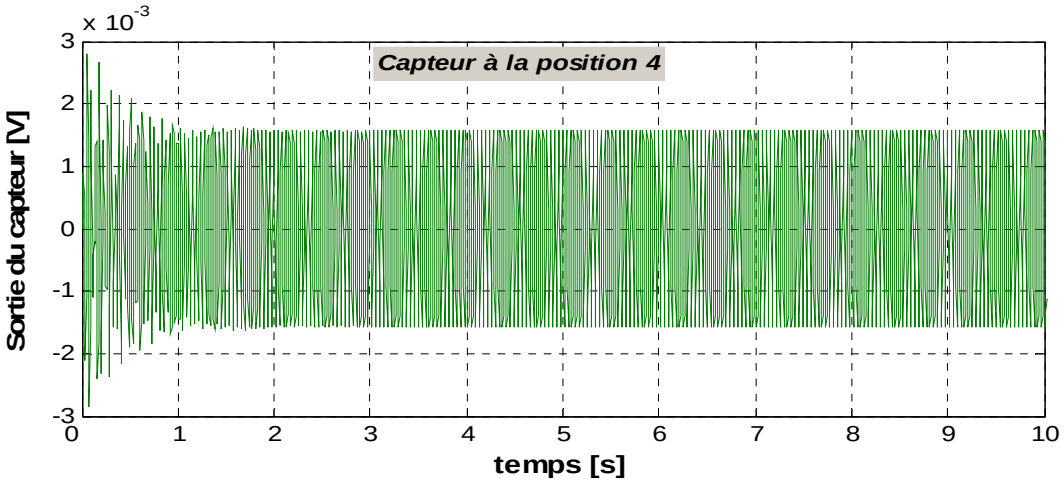


Fig.IV.13. Sortie du capteur *4* avant la commande

On applique les mêmes modèles de contrôle que la position *2* (cycle d'hystérésis linéaire et non linéaire). Les figures (IV.14), et (IV.15), (IV.16), montrent les résultats de simulation d'amortissement et d'élimination des vibrations de la poutre flexible.

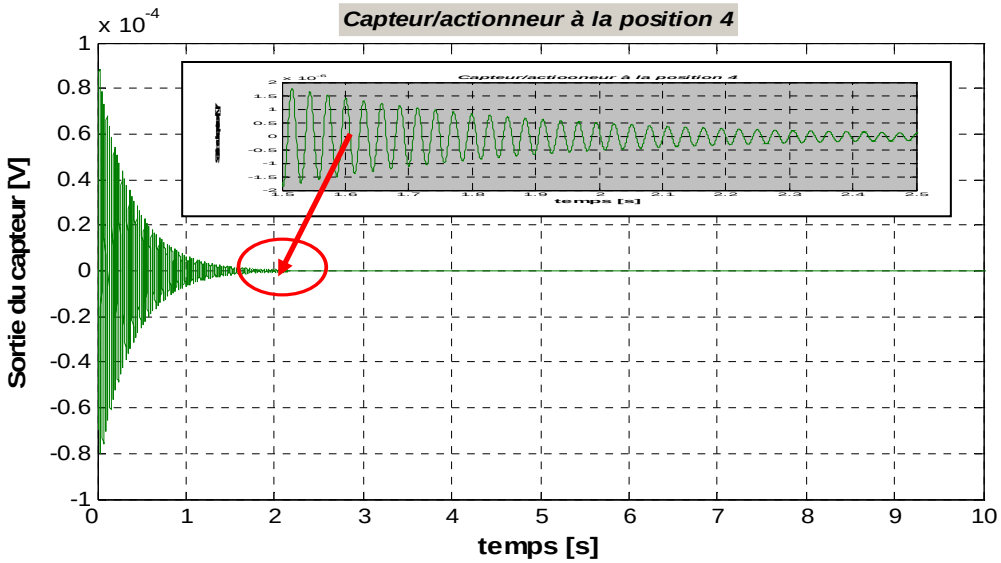


Figure.IV.14. Sortie du capteur *4* avec contrôle (actionneur linéaire)

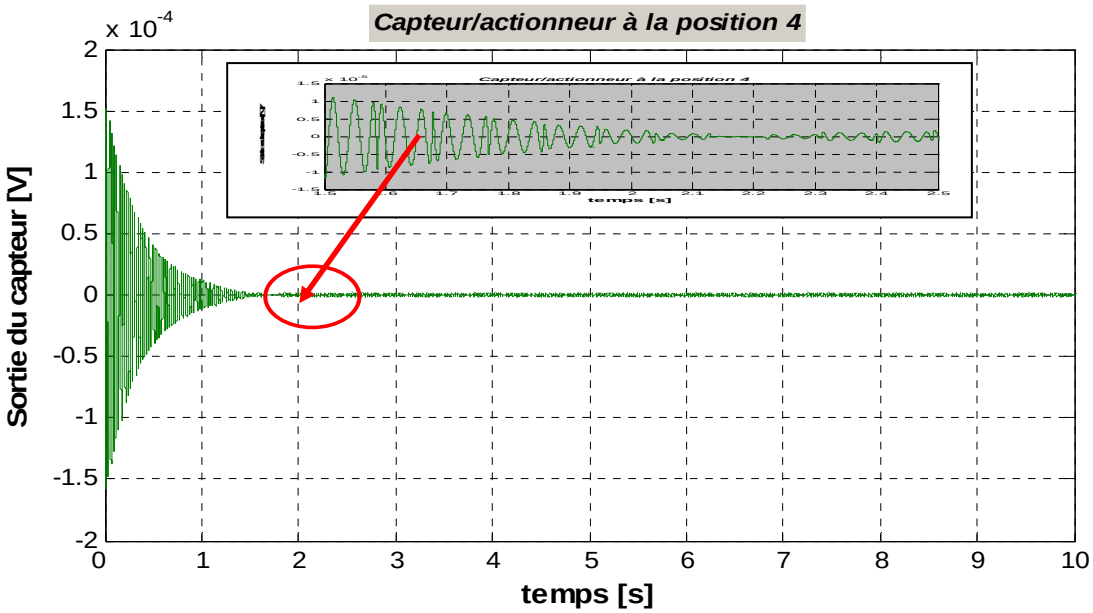


Figure.IV.15. Sortie du capteur 4 avec contrôle (actionneur non linéaire)

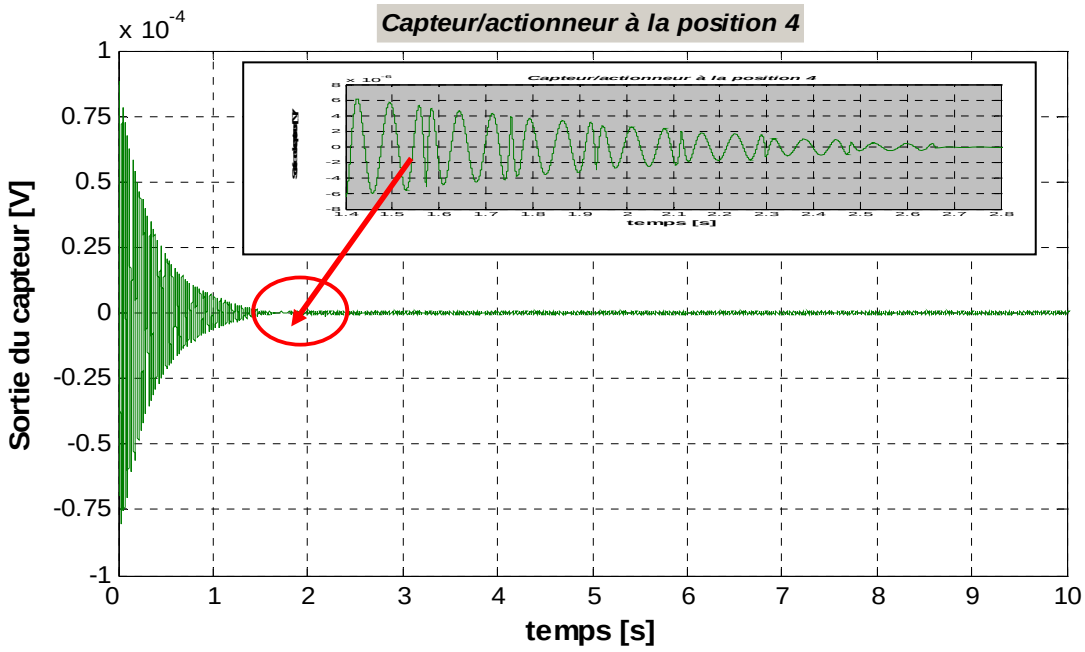


Figure.IV.16. Sortie du capteur 4 avec contrôle (actionneur non linéaire) + *PID*.

D'après ces résultats de la simulation, on remarque que la position de l'élément actionneur/capteur est très importante pour amortir et diminuer les vibrations engendrées par la poutre. Au niveau de la position de l'élément *2*, l'amplitude des vibrations est plus de deux fois supérieur à celui de la position *4*, dans le cas sans contrôle et ce rapport fois dix dans le cas de contrôle (l'application de l'actionneur), avec un rapport de:

(Amplitude de la position 2) *= (2**(Amplitude de la position 4)* *+ 2)*10.*

C'est-à-dire l'amplitude au niveau de l'élément *4* est moins de un dixième de la moitié que celle de l'amplitude de l'élément *2*. Du point de vue rapport des amplitudes, dans le cas des deux positions, l'effet de linéarisation et du régulateur *PID*, les résultats sont similaires.

A travers ces résultats de simulation, il est observé que pour amortir les vibrations engendrées par la poutre, une étude précise pour déterminer le bon positionnement des éléments de contrôle (actionneurs), et les éléments de mesure (capteurs) sur cette poutre flexible est nécessaire.

Pour mieux visualiser l'effet des deux modèles, une comparaison détaillée sur le même graphe a été faite, entre les deux positions de l'élément actionneur/capteur et ces effets sur l'amortissement des vibrations dans la poutre flexible. Les deux positions (*2* et *4*) ont été simulées dans les mêmes conditions de contrôle soit dans le cas linéaire ou non linéaire. La position *4*, a été prise comme position optimale de l'actionneur pour minimiser les vibrations de la poutre. Les figures (IV.17), (IV.18), et (IV.19), montrent une comparaison entre les deux positions (*2* et *4*) lorsqu'on applique le contrôleur (actionneur linéaire ou non linéaire).

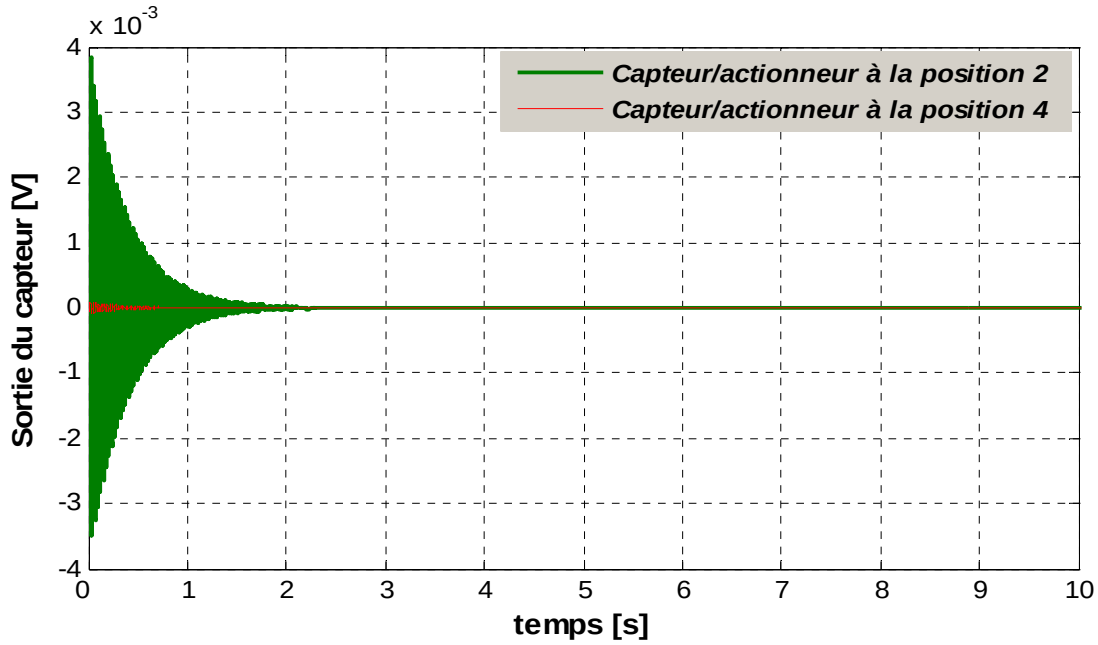


Figure.IV.17. Une comparaison entre les deux positions (*2* et *4*) avec contrôle linéaire

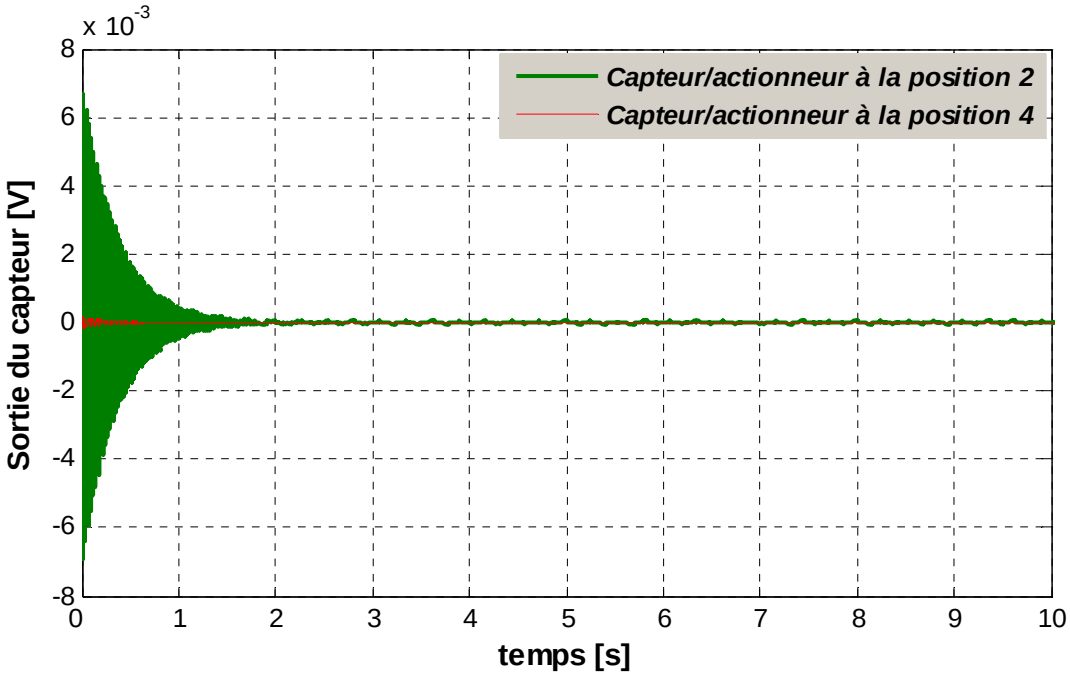


Figure.IV.18. Une comparaison entre les deux positions (*2* et *4*) avec contrôle non linéaire.

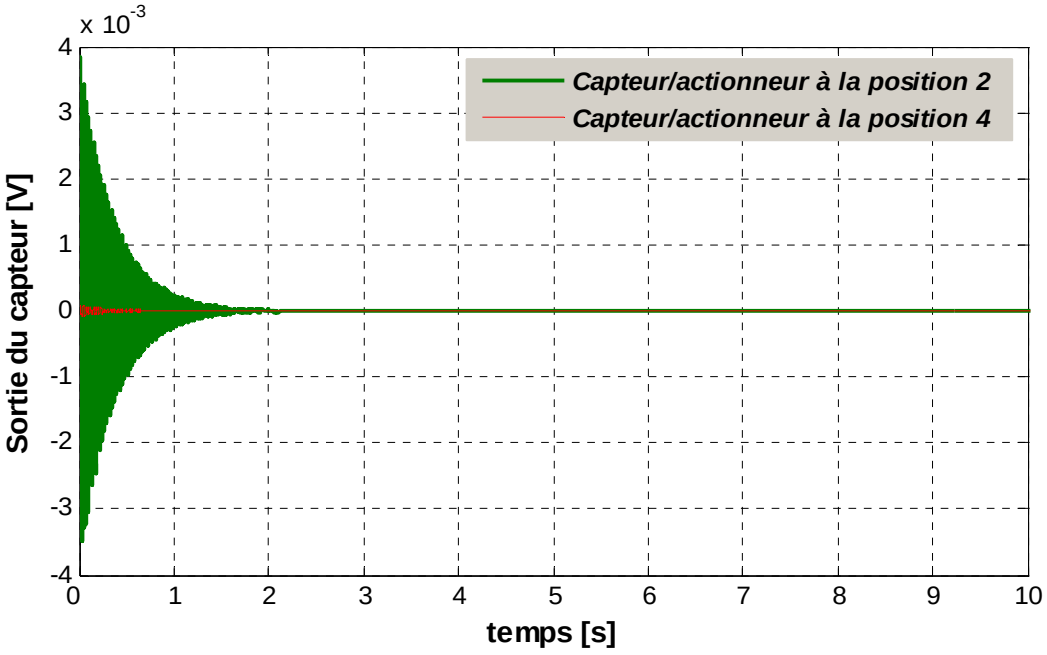


Figure.IV.19. Une comparaison entre les deux positions (*2* et *4*)
avec contrôle non linéaire + *PID*

D'après ces résultats de simulation, il est bien clair que la position de l'élément actionneur/capteur *4* est optimal et bien précise que la position *2*, par ce que nous observons que pour les différents cas de contrôle illustre dans les figures (IV.17), (IV.18), et (IV.19), l'amplitude de vibration (sortie du capteur) de la position *4* presque nulle par apport à l'amplitude de vibration de la position *2*, donc l'effet de la position de l'élément actionneur/capteur est très importante quand il est à l'extrémité libre (source de vibration) de la poutre flexible.

Pour valider les résultats de contrôle de la poutre flexible simulés précédemment, dans les deux positions (*2* et *4*) et pour les deux cas (linéaire et non linéaire), on applique le modèle simulé dans la figure (III.33) du chapitre III, qui montre un cycle d'hystérésis améliorés par régulateur *PID* proche de la courbe expérimentale d'un film piézoélectrique ($BaTiO_3$).

Les figures (IV.20), (IV.21), présentent la réponse du capteur à la position *2*, avant et après linéarisation du cycle d'hystérésis amélioré par un régulateur *PID* proche de la courbe expérimentale respectivement.

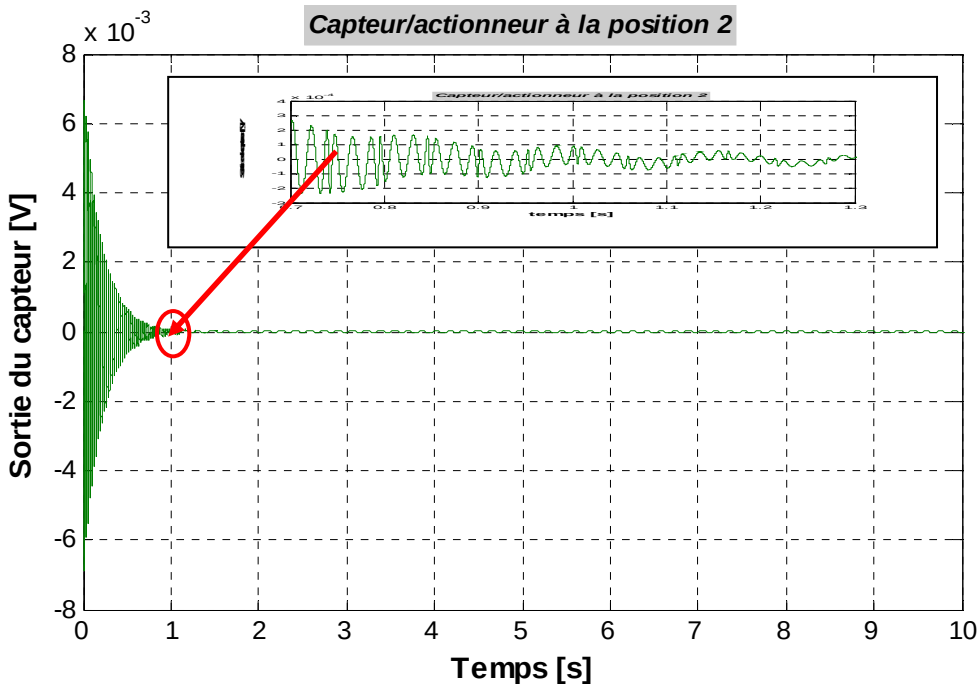


Figure.IV.20. Sortie du capteur à la position *2*, avant linéarisation du cycle d'hystérésis amélioré par un régulateur *PID* proche de la courbe expérimentale.

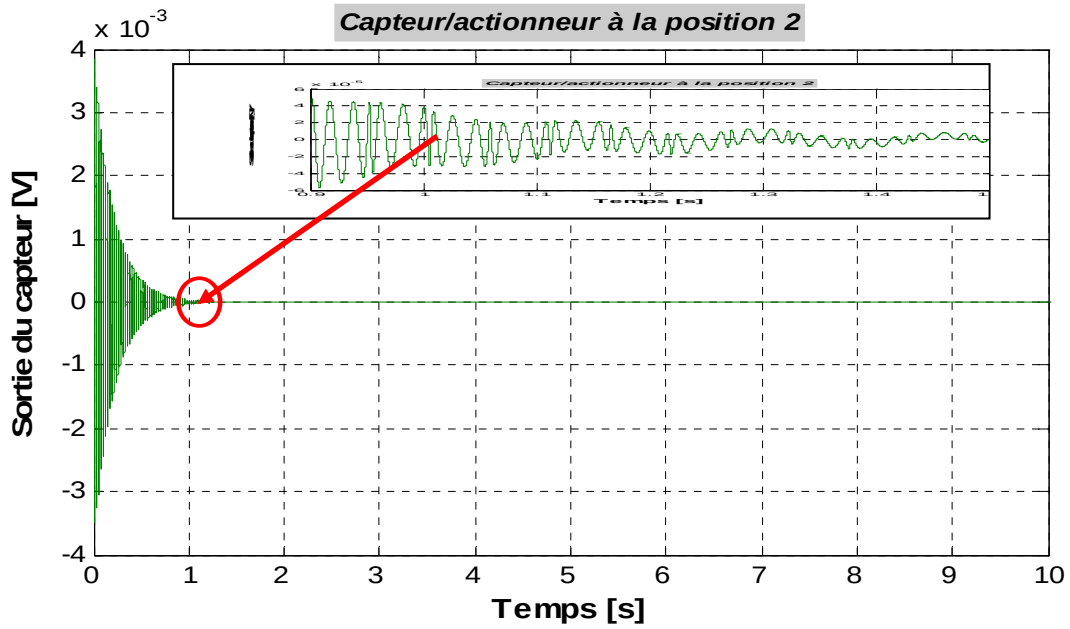


Figure.IV.21. Sortie du capteur à la position *2*, après linéarisation du cycle d'hystérésis amélioré par un régulateur *PID* proche de la courbe expérimentale.

On refait les mêmes démarches que les deux figures précédentes, seulement on change la position de l'élément capteur/actionneur à la position *4*. Les figures (IV.22), (IV.23), présentent la réponse du capteur à la position *4*, avant et après linéarisation du cycle d'hystérésis amélioré par un régulateur *PID* proche de la courbe expérimentale respectivement.

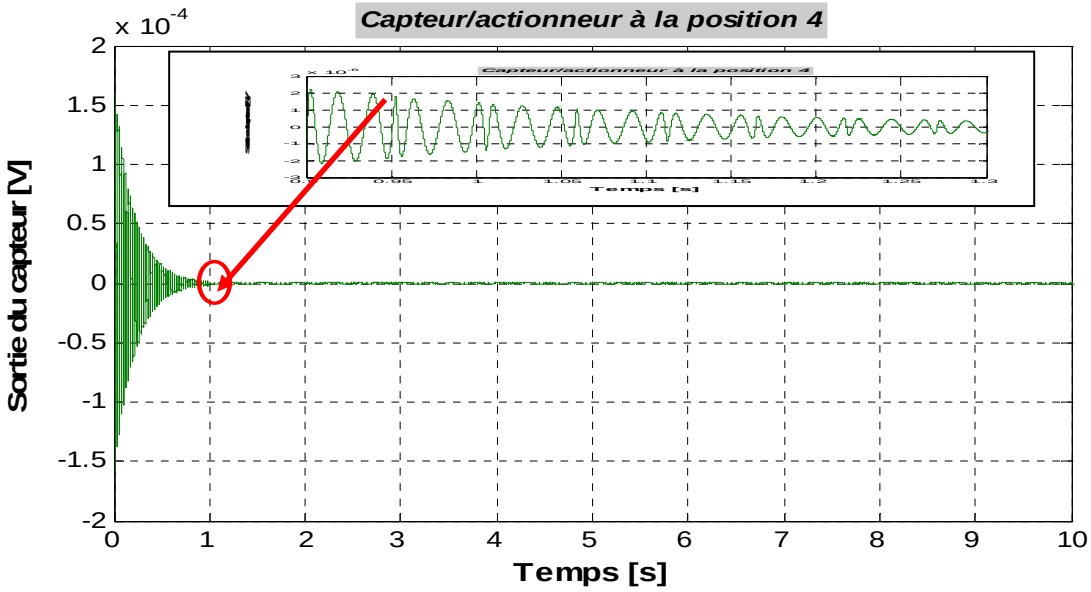


Figure.IV.22. Sortie du capteur à la position *4*, avant linéarisation du cycle d'hystérésis amélioré par un régulateur *PID* proche de la courbe expérimentale.

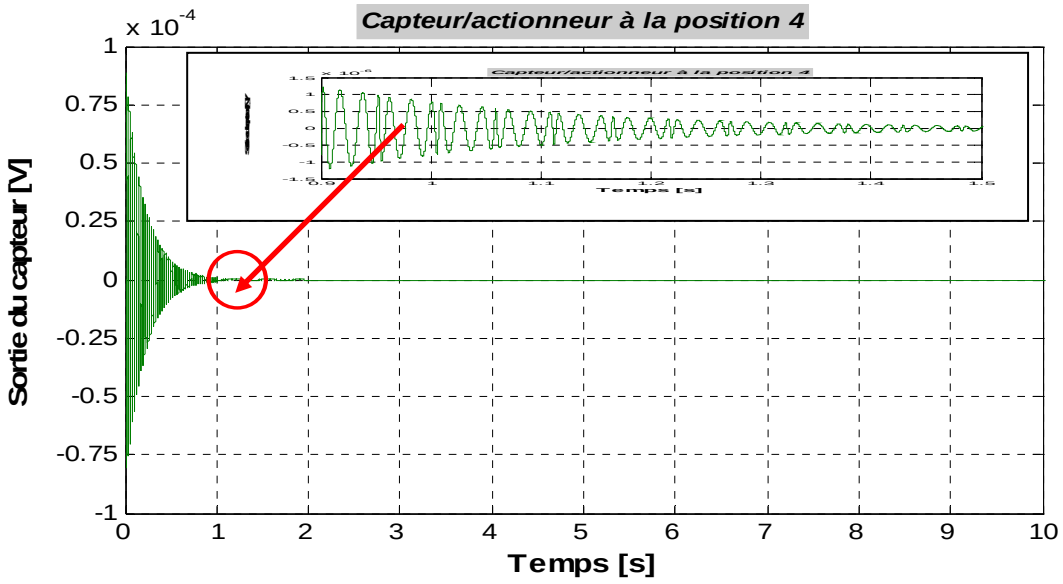


Figure.IV.23. Sortie du capteur à la position*4*, après linéarisation du cycle d'hystérésis amélioré par un régulateur *PID* proche de la courbe expérimentale.

D'après ces résultats, on observe que l'amortissement de l'amplitude des vibrations de la poutre est le même pour les deux positions (2 et *4*), que celle de simulation de modèle du Devonshire (soit avant ou après linéarisation), par contre l'instant qui permet la suppression totale des vibration est moins que ($t = 1s$ contre $t = 1.5$) le modèle de Dovenshire, qui montre la rapidité de temps de réponse.

IV.5.Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons vu l'utilité du contrôle actif comme moyen de contrôle intelligent pour amortir les vibrations produites dans la poutre flexible. L'actionneur piézoélectrique comme contrôleur non linéaire a été comparé à un système mécanique linéaire plutôt plus précis dans le cas des déplacements centimétriques. Le système mécanique présente aussi l'inconvénient d'être plus encombrant, moins compact et moins précis en micro déplacements. On a vu aussi un modèle d'espace d'état d'une poutre flexible divisé en quatre éléments finis avec une paire actionneur/capteur positionnée aux éléments *2* et *4*.

Les deux modèles d'actionneur piézoélectrique sont appliqués à l'entrée du système vibrant à fin de commander l'amortissement de la poutre flexible après mesure des vibrations au sortie. La simulation des deux modèles, dans l'espace d'état, montre effectivement l'effet et l'importance d'un actionneur linéaire et non linéaire. La différence apparaît par comparaison de l'effet des deux actionneurs (linéaire et non linéaire) au même instant. L'association d'un régulateur *PID* à l'actionneur a été validée par comparaison du cycle d'hystérésis analytique au cycle mesuré.

conclusion générale

Conclusion générale

Dans ce mémoire, nous avons tenté d'apporter notre contribution à l'amélioration de la qualité des informations fournies par les organes de perception des matériaux dites intelligents, de fait, à l'évolution des transducteurs intelligents. Les actionneurs piézoélectriques étudiés dans ce mémoire, sont définis comme des contrôleurs et des régulateurs d'hystérésis pouvant contrôler et amortir les vibrations indésirables dans les différents systèmes vibrants. Cette particularité en a fait d'excellents candidats pour l'implantation des fonctionnalités de validation les plus évoluées, surtout dans le domaine de la robotique, l'aéronautique, l'aérospatial.

Le matériau ferroélectrique $BaTiO_3$ (piézoélectrique) réalisé et analysé expérimentalement par ma collègue **[43]** est une céramique massive et ayant une caractéristique réversible dans le fonctionnement, capteur ou actionneur (effet direct ou effet inverse), a été utilisé comme actionneur.

Parmi les différents modèles de comportement de ces céramiques on a proposé deux modèles (mécanique et mathématique de *Landau Devonshire*), qui montrent les deux types d'actionneurs (linéaire et non linéaire), avec leurs avantages et inconvénients dans l'application industrielle. Le cycle d'hystérésis mesuré sur l'échantillon de $BaTiO_3$ a été comparé au modèle analytique de *Landau Devonshire*. Le modèle donne une forme de cycle correspondant à un ferroélectrique doux (cycle large c'est à des pertes par hystérésis importantes). Ces pertes ont influencés les performances de l'actionneur du point de vue commande. Les pertes se sont traduites par des amplitudes de vibrations importantes.

En revanche après identification des paramètres de ce cycle expérimental, les paramètres trouvés nous ont permis d'identifier le régulateur *PID* permettant de rapprocher le cycle d'hystérésis théorique au cycle expérimental. Le cycle expérimental correspond en fait à un ferroélectrique dur présentant moins de pertes d'hystérésis et par conséquence l'amplitude des vibrations est réduite.

Le comportement hystérésis de ces transducteurs à une importance dans le contrôle des vibrations indésirables. Ces contrôles se basent donc sur la variation des paramètres caractéristiques et d'identification de ces modèles.

Les deux modèles ont été analysés du point de vue pertes par hystérésis et linéarisation. Les pertes par hystérésis sont influencées par la fréquence d'entrée et par la résistance placée en série dans le cas du modèle de *Landau Devonshire* et l'amortisseur dans le cas du modèle mécanique.

En revanche la linéarité du cycle est influencée par la polarisation rémanente et la saturation par la tension d'entrée (la contrainte).

La commande en boucle fermée du système par hystérésis nous a permis de :

- D'identifier les paramètres du régulateur *PID*.
- D'identifier les paramètres du cycle d'hystérésis expérimental.
- De montrer l'effet des pertes par hystérésis sur la commande du système.
- De déterminer la position optimale de l'actionneur pour une meilleure commande. La position *4* sur la poutre flexible est considérée comme position optimale.

L'utilisation de l'actionneur piézoélectrique est justifiée par sa compacité, moins encombrant, temps de réponse rapide et adaptatif. Les résultats de simulation montrent qu'il est recommandé d'utiliser des ferroélectriques durs (moins de pertes d'hystérésis) pour minimiser les vibrations.

Perspectives :

- Commande par cycle hystérésis par multi actionneurs répartis
- Vérification du modèle de frottements sec
- Application à un système flexible à configuration géométrique quelconque.

Bibliographie

Bibliographie

[1] P.DE BOE. « Les éléments piézo-laminés appliqués à la dynamique des structures ». Thèse de doctorat de l'université de liége 2003.

[2] G.L'HOSTIS, H.DROBEZ, « Matériaux et structures composites intelligents ». 18ème Congrès Français de Mécanique Grenoble 27-31 août 2007.

[3] F.GIRAUD, « Modélisation causale et commande d'un actionneur piézo-électrique à onde de progressive. ». Thèse de doctorat de l'université de Lille I, 2002.

[4] C.VIGUIER, « Contribution au développement d'actionneur électroactifs pour l'assistance circulatoire, application à la mise au point d'une fonction antithrombotique ». Thèse de doctorat de l'institut national polytechnique de Toulouse 2005.

[5] J.JUUTI, «Pre-stressed piezoelectric actuator for micro and fine mechanical applications». Revue de l'université de l'Oulu, Finlande 2006.

[6] S. LE DEREN, « Elaboration de couche épaisses piézoélectrique déposées sur substrats pour les applications microtechniques». Thèse de doctorat de l'Institut National des sciences appliquée de Lyon, 2000.

[7] HBM.Darmstadt, « L'effet piézoélectrique et ses applications».
http://www.hbm.fr/custserv/SEURLF/ASP/SFS/ID.813/MM.4,36,34/SFE/techarticles.htm

[8] A.HAJJAJI, «Caractérisation multi échelle et lois de comportement dans les matériaux ferroélectriques ». Thèse doctorat de l'institut national des sciences appliquées de Lyon, 2007.

[9] W.SZLABOWICZ, « Contribution au dimensionnement et à la réalisation d'actionneur piézoélectrique à rotation de mode fort couple pour application aéronautiques ». Thèse de doctorat de l'institut national polytechnique de Toulouse, 2006.

[10] G. SEBALD, « Nouveaux monocristaux à forte conversion piézoélectrique : croissance, modélisation et caractérisation. ». Thèse doctorat de Institut National des sciences appliquée de Lyon, 2004.

[11] G.ROBART, « Les céramiques pour les capteurs et les actionneurs ». Revue de l'EPFL, laboratoire de céramique de Germany 2005.

[12] E. DEFAY, « Elaboration et caractérisation de couche mince piézoélectrique de *Pb (Zr, Ti) O_3* sur silicium pour applications aux microsystème ». Thèse de doctorat de Institut National des sciences appliquée de Lyon, 1999.

[13] Z.GHALMI, « Contribution au développement d'un capteur ultrasonique pour mesurer l'épaisseur de la glace». Thèse de doctorat de l'université du Québec, 2006.

[14] C.CIBERT, « Films minces d'oxyde et de nitrure d'aluminium pour application hyperfréquences, synthèse par PLD et PECVD et caractérisations ». Thèse de doctorat de l'université de Limoges, France, 2007.

[15] A.BENAYAD, « Matériaux monocristallins à forte activité piézoélectrique: élaboration, caractérisation et application ». Thèse de doctorat de l'institut national des sciences appliquées de Lyon 2005.

[16] A. VALENTINI, « Conception et Réalisation d'un Micro actionneur Piézo-électrique ». Thèse de grade 'ingénieur civil mécanicien d'Université Libre de Bruxelles Faculté de Sciences Appliquées, 2001.

[17] N. RIZET « Contrôle actif de vibrations utilisant des matériaux piézoélectriques », Thèse de doctorat de l'Institut National des Sciences Appliques de Lyon, 1999.

[18] J-M.BREGUET, « Actionneurs "stick and slip" pour micromanipulateurs ». Thèse de doctorat de l'école polytechnique fédérale de Lausanne 1998.

[19] Phsikal Instrumente. « Piezœlectric actuator in positioning ». www.physikinstrumente.de/products/ section4/content.php Site consulté le 22 juin 2008.

[20] H.J.HUG, « Scanning probe methods (SPM) ». Revue de NCCR Nanoscale Science University of Basel Swaziland 2006.

[21] J.LEMBERGER, J.D.THIEBAUT, « Conception et réalisation d'une table de micro positionnement à trois degrés de liberté ». Thèse d'ingéniorat de l'université libre de Bruxelles 2002.

[22] J-M. BREGUET, W.DRIESEN, «Application of piezo-actuted micro-robots in micro-biology and material science ». Article de Laboratoire de Systèmes Robotiques, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (LSRO-EPFL) Swaziland 2004. *p 1-8*.

[23] S.MITRA, « Design and manufacture of base/filament interconnects and filament patterning of piezoelectric cochlear implant ». Thèse de master de Bhavans College, Mumbai, India 1999.

[24] Physik instrument (PI) www.pi.ws.com , « Designing with piezoelectric transducers: nanopositioing fundamentals ». Revue, Germany /09/2005.

[25] F. PIGACHE, « Modélisation causale en vue de la commande d'un transducteur piézoélectrique plan pour une application haptique », Thèse de doctorat de l'Université des Sciences et Technologies de Lille, 2005.

[26] H. FRAYSSINGES, «Etude des effets non linéaires et des pertes dans les moteurs ultrasonores », Thèse de doctorat de l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2001.

[27] P.ANTOINE, K.SADASING, « Transducteur piézocéramique large bande». Projet de fin d'étude de Hes. (Haute école spécialisée), Ecole d'ingénieurs Genève 2001.

[28] D.CAMPOLO, M.SITTI, R-S.FEARING, « Efficient charge recovery method for driving piezoelectric actuators with quasi-square waves ». IEEE Trans. on ultrasonic, ferroelectrics, and frequency control, vol. 50, n°. 1, January 2003.

[29] S-C.WOO, K-H.PARK, N-S.GOO, « Influences of dome height and stored elastic energy on the actuating performance of a plate type piezoelectric composite actuator ». Sensors and Actuators www.elsevier.com/locate/sna , de l'université de Konkuk, Korea. 2007. *P 1-10*.

[30] E.MECHANICS, « Deformation and force characteristics of laminated piezoelectric actuators». Thèse de doctorat de l'institut polytéchnique de Blacksburg, Virginia 2004.

[31] G.SANG CHOI, H.S. KIM, « A study on position control of piezoelectric actuators », IEEE, Gumaracs ISIE'97, Portugal. *P 851-855.*

[32] W-T.ANG, F-A.GARMAON, P-K.KHOSAL, « Modelling rate dependent hysteresis in piezoelectric actuators».Conference on Intelligent Robots and Systems. Article de l'IEEE de l'institut de robotiques, Carnegie Mellon university, Pittsburgh, USA 2003. *P 1975-1980.*

[33] H. BEN AHMED, M. ANTUNES, « Généralités sur les actionneurs linéaires ». Article de l'Ecole Normale Supérieure de Cachan de Bretagne, 2002. http://www.bretagne.ens-cachan.fr/dochtml/docD/dochtml/0302.html

[34] T.HEMESEL, M.MRACKEK, J.TWIEFEL, P.VASILJEV, «Piezoelectric linear motor concepts based on coupling of longitudinal vibrations ». Ultrasonics 44 (2006) *p 591–596*.

[35] A-J.FLEMING, S-O-R.MOHEIMANI, «A grounded-load charge amplifier for reducing hysteresis in piezoelectric tube scanners ». Revue de l'université de Newcastle, Callaghan, Australia 2005.

[36] J.REBERT, E.STELTZ, « Nonlinear performance limits for high energy density piezoelectric bending actuators ». Revue de l'univérsité de California, USA 2004.

[37] J.M.T.A. ADRIANS, W.L. KONING, R. BANNING, «Design and modeling of a piezo-actuated positioning mechanism», Proceeding of the 36th conference on decision and control. San Diego, California USA. December 1997 *P1978-1983.*

[38] M.E.VAUGHAN, « The design, fabrication, and modelling of a piezoelectric linear motor ». Thèse de master de l'université de Blacks burg, Virginia, 2001.

[39] J.FERNANADEZ LOPEZ, « Modelling and optimization of ultrasonic linear motors ». Thèse de doctorat de l'école polytechnique Fédérale de Lausanne, 2006.

[40] R.PERIASAMY, « Shape control of composite structures with optimally placed piezoelectric patches ». Thèse de master de l'université de Waterloo, Ontario, Canada 2008.

[41] E.BOUCHER, «Elaboration et caractérisation de céramiques *PZT* bi substituées et modélisation non linéaire de leur comportement en contrainte et en champ électrique ». Thèse de doctorat, de l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2002.

[42] S. BOUMOUS, Z. BOUMOUS, S. BELKHIAT, «Modélisation et simulation du cycle d'hystérésis dans les céramiques PZT» proceeding du IX journées maghrébines des sciences des matériaux, Oran, Algérie, 2004.

[43] S.BOUMOUS, Z.BOUMOUS, S.BELKHIAT, « Mesure et simulation des pertes par hystérésis dans les condensateurs ferroélectriques ». Proceeding du XI journées maghrébines des sciences des matériaux, *4-8* novembre 2008 Mahdia Tunis.

[44] A.FAIZ, « Amortissement vibratoire et anéchoisme par traitement non linéaire d'éléments piézoélectriques». Thèse de dectorat de l'institut national des sciences appliquées de Lyon 2006.

[45] H-CH.LIAW, B.SHIRINZADEH, J.SMITH, « Enhanced sliding mode motion tracking control of piezoelectric actuators ». Sensors and Actuators www.elsevier.com/locate/sna , de l'université de Clayton, Australie. 2007.

[46] O.HILBRUNNER, « Développement et optimisation d'un système de contrôle actif pour les absorbants acoustiques hybrides ». Thèse de doctorat de l'école central de Lyon 2003.

[47] Y.YAMAN, D.WAECHTER. « Active vibration control of a smart plate » *ICAS2002* CONGRESS *p1-10*.

[48] S.BEVAN, « Piezoceramic actuator placement for acoustic control of panels ». Revue de NASA/CR- 2001.

[49] K.KUHNEN, H.JANOCHA. « Adaptive inverse control of piezoelectric actuators with hysteresis operators ». Article de LPA (Laboratory for Process Automation) de l'université de Saarland, Saarbrucken, Germany, 2000 *p1-6*.

[50] G. AKHRAS, « Des matériaux intelligents et des systèmes intelligents pour l'avenir », Revue militaire canadienne, 2000. *P 25-31*.

[51] K.S. AL ATHEL « Effect of piezoelectric actuator placement on controlling the modes of vibration for flexible structures», thèse Mastère de l'Université de le Roi Fahd, Dhahran, Arabie Saudi, 2005.

[52] F. DUFAULT, G. AKHRAS, «Applications des structures intelligentes dans les aéronefs », Revue de la Force Aérienne du Canada, 2008.*P 31-39.*

[53] T.C. MANJUNATH, B. BANDYOPADHYAY, « Multivariable control of smart timoshenko beam structures using *POF* technique». Proceedings of the *III* International conference .System Identification and Control Problems. SICPRO .04 Moscow *28-30* January 2004. *P 74-90.*

[54] T.C. MANJUNATH, B. BANDYOPADHYAY, « Multivariable control of a smart structure cantilever beam using fast output samping feedback ». Proceedings of the III International conference .System Identification and Control Problems. SICPRO .04 Moscow 28-30 January 2004. *P 1300-1312.*

[55] C.BESNAINOU, H.BOUTIN, « Contrôle actif sur instrument acoustiques ». Thèse de master *2*, de l'université de Pierre et Marie Curie, Paris, France. 2006.